



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Identificación de Islas de
Calor Urbanas en la Ciudad
de México mediante
Sensores Remotos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Ana María Rodríguez Mañón

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A mi tutor y asesor, Rodrigo Sepúlveda, por las enseñanzas y aprendizajes transmitidos desde mi primer día en la Facultad de Ingeniería. Por creer en mis capacidades y compartir de sus conocimientos y tiempo conmigo.

A mis papás, Patricia y Efraín, por la dedicación incansable y el tiempo que siempre han invertido en mí. Gracias por su apoyo constante, su paciencia, cariño y comprensión a lo largo de esta etapa y de todas las anteriores. Cada uno de mis logros también es suyo.

A mi hermano Santiago, por ser un ejemplo de constancia y esfuerzo. Y a toda mi familia, gracias por acompañarme y brindarme su apoyo en cada etapa de mi aprendizaje y crecimiento.

A Emiliano, por su cariño, paciencia, confianza y motivación constante, así como por las conversaciones llenas de aprendizajes. Pero, sobre todo, por brindarme los medios y el apoyo necesario para culminar este trabajo de investigación.

A Dominicque, por ser una parte indispensable de mi vida, por crecer junto conmigo y por compartir risas y aprendizajes en cada etapa. Gracias por creer en mí desde siempre.

A todas mis amistades por estar siempre presentes, por su compañía y por hacer de este camino uno más ligero. Gracias por su apoyo, sus palabras de aliento y por ser una fuente constante de energía y alegría cuando más lo he necesitado.

Índice

Introducción	8
Capítulo 1. Estudios de climatología a lo largo del tiempo: Antecedentes	11
Capítulo 2. México y sus estudios de climatología: Estado del arte	16
Capítulo 3. Marco teórico	19
<i>Percepción remota</i>	19
Color verdadero (RGB)	22
Falso color para detección de zonas urbanas	22
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	23
Temperatura Superficial Terrestre (LST)	24
<i>Islas de Calor Urbanas</i>	26
<i>Energía</i>	27
<i>Temperatura atmosférica</i>	28
Objetivo	30
Capítulo 4. Metodología	30
<i>Plataformas y fuentes de información</i>	31
USGS: Earth Explorer	31
QGIS	32
Capítulo 5. Resultados y análisis de resultados	33
<i>Zona de estudio</i>	33
<i>Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color</i>	42
<i>NDVI y LST</i>	44
<i>Identificación de islas de calor urbanas y zonas “frías”</i>	48
Almacenes y naves industriales Azcapotzalco	49
Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)	51
Expo Santa Fe.....	53
Paradero de Taxqueña - Central de Autobuses del Sur y Club Campestre	55
Estacionamiento de Six Flags México	57
Fórum Buenavista y biblioteca Vasconcelos.....	59
World Trade Center (WTC) México	61
Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)	63
Primera Sección del Bosque de Chapultepec	65
<i>Mitigación de las islas de calor urbanas</i>	67
Áreas verdes y vegetación en espacios públicos	67
Parques, camellones y corredores verdes	67
Vegetación en estructuras urbanas	69
Cubiertas de agua.....	74
Materiales reflejantes	75
Geometría urbana	76

Políticas y concientización	77
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	80
Referencias.....	82
Anexos	91

Índice de figuras

Figura 1. Representación gráfica del ciclo anual de la temperatura en la publicación The Climate of London. Mills, 2008.....	11
Figura 2. Curvas de temperatura anuales para zona urbana y rural. Mills, 2008.....	11
Figura 3. Representación esquemática de la atmósfera urbana que ilustra la clasificación de la modificación térmica de dos capas. Oke, 1976.....	13
Figura 4. Ciudades con población mayor a 340,000 habitantes con estudios de ICU en México. Manzanilla-Quiñones, 2022.....	16
Figura 5. Espectro visible por el ojo humano. MappingGIS, 2020.....	21
Figura 6. Imagen RGB. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	22
Figura 7. Imagen de color verdadero. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	23
Figura 8. Imagen NDVI con paletas de color diferentes. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	24
Figura 9. Imagen de LST con paletas de color diferentes. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	25
Figura 10. Generación de la ICU. Elaboración propia con datos de Rizwan et al., 2008.....	26
Figura 11. Esquema metodológico del trabajo de investigación. Elaboración propia.....	31
Figura 12. Localización y delimitación geográfica de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2020.....	33
Figura 13. Suelo urbano y de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de INEGI, 2010a.....	34
Figura 14. Uso de suelo y vegetación de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, serie VII, 2021.....	35
Figura 15. Áreas verdes y suelo de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2010 y SEDEMA, 2017.....	36
Figura 16. Elevaciones de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2013.....	38
Figura 17. Altitudes máximas y mínimas en la Ciudad de México. INEGI, 2013.....	39
Figura 18. Climas de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de INEGI, 2021.....	39
Figura 19. Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color para el año 2022. Elaboración propia con datos de Landsat 8.....	42
Figura 20. Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color para el año 2024. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	43
Figura 21. NDVI y LST para el año 2022. Elaboración propia con datos de Landsat 8.....	44
Figura 22. NDVI y LST para el año 2024. Elaboración propia con datos de Landsat 9.....	45
Figura 23. Valores de NDVI máximos de 2013 a 2024. Elaboración propia.....	46
Figura 24. Valores de NDVI mínimos de 2013 a 2024. Elaboración propia.....	46
Figura 25. Valores de LST máximos de 2013 a 2024. Elaboración propia.....	47
Figura 26. Valores de LST mínimos de 2013 a 2024. Elaboración propia.....	47
Figura 27. ICU de los almacenes y naves industriales en Azcapotzalco. Elaboración propia.....	49
Figura 28. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de los almacenes y naves industriales en Azcapotzalco (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	50
Figura 29. ICU del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Elaboración propia.....	51
Figura 30. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del AICM (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	52
Figura 31. ICU de la Expo Santa Fe. Elaboración propia.....	53

Figura 32. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la Expo Santa Fe (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	54
Figura 33. ICU del Paradero de Taxqueña y de la Central de Autobuses del Sur. Zona "fría" del Club Campestre de la Ciudad de México. Elaboración propia.	55
Figura 34. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del Paradero de Taxqueña y de la Central de Autobuses del Sur y del Club Campestre de la Ciudad de México (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	56
Figura 35. ICU del estacionamiento de Six Flags México. Elaboración propia.	57
Figura 36. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del estacionamiento de Six Flags México (2022 arriba y 2024 abajo).....	58
Figura 37. ICU de Fórum Buenavista y zona "fría" de la Biblioteca Vasconcelos. Elaboración propia.	59
Figura 38. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de Fórum Buenavista y la biblioteca Vasconcelos (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	60
Figura 39. ICU del WTC México. Elaboración propia.	61
Figura 40. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del WTC México (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	62
Figura 41. Zona fría de la REPSA. Elaboración propia.	63
Figura 42. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la REPSA (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.	64
Figura 43. Zona "fría" en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec. Elaboración propia.	65
Figura 44. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.....	66
Figura 45. Recuperación del Parque Ecológico de Xochimilco con el Programa Sembrando Parques. Méndez, 2022.	68
Figura 46. Árboles en banquetas del corredor Roma-Condesa en la CDMX. Tinsa, 2022.	68
Figura 47. Componentes básicos de una azotea verde. Ramírez, 2011.	70
Figura 48. Azotea verde del edificio del INFONAVIT en CDMX. Díaz, 2022.	70
Figura 49. Balcón verde en CDMX. Carrillo, 2024.....	71
Figura 50. Tipos de muros verdes: continuo (izquierda) y modular (derecha). Ávila-Hernández, et al., 2023.....	72
Figura 51. Muro verde interior. Aquatopia, 2024.	72
Figura 52. Muro verde exterior en el Musée du Quai en París, Francia. Heniak, 2020.....	72
Figura 53. Tipos de instalación de fachadas verdes. Ávila-Hernández, et al., 2023.	73
Figura 54. Fachada verde. May, 2018.....	73
Figura 55. Fachada verde con plantas trepadoras. Bottero, 2018.	73
Figura 56. Combinación de cuerpos de agua y vegetación en la Primera Sección del Parque de Chapultepec. Gaxiola, 2016.	74
Figura 57. Fuente en el Parque de la Bombilla en la CDMX. Escapadas.mx, 2024.	75
Figura 58. Efectos de los materiales reflejantes en techos. Arup, 2022.	76
Figura 59. Techos con pintura o materiales reflejantes. American Wheatherstar, 2022.	76
Figura 60. Imágenes de color verdadero correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.	91
Figura 61. Imágenes de falso color correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.	92
Figura 62. Imágenes de LST correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.....	93
Figura 63. Imágenes de NDVI correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.	94

Índice de Tablas

Tabla 1. Características misión Sentinel 2. Elaboración propia con datos de ESA, 2024.	20
Tabla 2. Características de las misiones Landsat 8 y 9. Elaboración propia con datos de USGS, 2024.....	21
Tabla 3. Interpretación de valores de NDVI. Elaboración propia con datos de Toribio, 2019.....	23
Tabla 4. Suelo de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de SEDEMA, 2015.	34
Tabla 5. Superficie del uso de suelo y vegetación de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, serie VII, 2021.....	35
Tabla 6. Áreas verdes en Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2010 y SEDEMA, 2017.	37
Tabla 7. Habitantes por alcaldía en la Ciudad de México, 2020. Fuente: INEGI, Censo de población y vivienda, 2020.	37
Tabla 8. Temperaturas máxima, media y mínima en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2024.	40
Tabla 9. Características de las imágenes satelitales procesadas. Elaboración propia con datos de USGS, 2024.	41
Tabla 10. Resumen de los valores máximos y mínimos registrados de NDVI y LST en CDMX de 2013 a 2024.	45
Tabla 11. Identificación de ICU o zonas "frías" en las alcaldías de la CDMX. Elaboración propia.	48
Tabla 12. Ventajas y desventajas de los métodos, técnicas o acciones de mitigación enunciados. Elaboración propia.....	78

Abreviaciones

PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

CGEI. Contaminación por Gases de Efecto Invernadero

ICU. Isla de Calor Urbana

ICS. Isla de Calor Superficial

ZMVM. Zona Metropolitana del Valle de México

CDMX. Ciudad de México

PR. Percepción Remota

NDVI. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

LST. Temperatura Superficial Terrestre

CONAPO. Comisión Nacional de Población

INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística

SEDEMA. Secretaría del Medio Ambiente

SIG. Sistemas de Información Geográfica

COV. Compuestos orgánicos volátiles

USGS. United States Geological Survey

UTC. Universal Time Coordinated

WTC. World Trade Center

AICM. Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México

CIEC. Centro Internacional de Exposiciones y Convenciones

REPSA. Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel

UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México

SO₂. Dióxido de azufre

NO₂. Dióxido de nitrógeno

O₃. Ozono

CO₂. Dióxido de carbono

Introducción

En los últimos años, las zonas metropolitanas han experimentado un rápido crecimiento poblacional denominado urbanización. Este fenómeno se caracteriza por la mayor demanda de espacio urbano, lo que origina la implementación y construcción de infraestructura para albergar a los habitantes y el aumento del uso de vehículos en el área. En 1800, cerca del 2% de la población mundial residía en ciudades. Después, en 1900, el número de personas viviendo en zonas urbanas aumentó a 13%. Para el año 2000, este porcentaje aumentó a 46% y fue a partir del 2007 en el que se tuvo el primer registro de que más de la mitad de la población mundial albergaba en ciudades, como lo sigue siendo en la actualidad. Aunque más de la mitad de la población mundial vive en zonas urbanas y solo ocupan el 3% del territorio mundial, son responsables del consumo entre 60% y 80% de la energía global y generan el 75% de las emisiones de carbono en el mundo. Se tiene proyectado que para el año 2030, el 60% de la población (o más) será población urbana y que para el año 2050, aproximadamente el 69% de los habitantes mundiales (6.5 mil millones de personas) estarán establecidas en zonas urbanas (PNUD, 2024).

México es un país predominantemente urbano, tan urbano que en el año 2003 se estimaba que 7 de cada 10 mexicanos residían en ciudades (CONAPO, 2001). Actualmente, el 80% de la población del país vive en ciudades. Ahora bien, en la Ciudad de México reside el 7.5% de la población nacional y se concentra el 16.5% del producto interno bruto (PIB). La capital del país genera ingresos y empleos de prestación de servicios y de consumo que contribuyen del 3.2% en la contaminación nacional por gases de efecto invernadero (CGEI), que son los contaminantes causantes del cambio climático. Concretamente, la Ciudad de México (CDMX) se encuentra expuesta tanto de forma ambiental como económica y socialmente a diversos impactos del cambio climático, por lo que es de suma importancia que sea responsable y contribuya de forma activa al esfuerzo nacional e internacional para la acción climática. Entre los territorios afectados por el cambio climático en la Ciudad se encuentran alcaldías como Gustavo A. Madero, Iztacalco y Venustiano Carranza, por efectos de altas temperaturas; Cuajimalpa, Tlalpan y Xochimilco, por bajas temperaturas; Cuajimalpa y Tlalpan, por abundante precipitación; Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza, por poca precipitación. De igual forma es importante mencionar que al oriente de la Zona Metropolitana del Valle de México, como es el caso de Chalco, Nezahualcóyotl y Gustavo A. Madero, se presentan lluvias torrenciales con efectos importantes para los habitantes de esta zona (Ruíz, 2022).

El desarrollo urbano es la principal razón del crecimiento económico, implicando una expansión de la industria y de los medios de transporte, pero a su vez este crecimiento y expansión alteran los microclimas urbanos incrementando la temperatura de la superficie terrestre. Tal es el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), cuya rápida urbanización ha involucrado un complejo proceso en la transformación del paisaje, alterando el funcionamiento y estructura de los ecosistemas originales. En las últimas décadas, el crecimiento socioeconómico ha

provocado una pérdida en la calidad de vida de los habitantes por el aumento de problemas ambientales como el cambio climático, temperaturas extremas y la presencia permanente de fenómenos de Isla de Calor Urbana (ICU) e Isla de Calor Superficial (ICS).

Las ICU se relacionan directamente con el incremento de la temperatura, pero a su vez aumentan los niveles de contaminantes del aire urbano porque las partículas de los contaminantes quedan atrapadas en las capas del aire cercanas al suelo y, en conjunto con la radiación solar, se genera un incremento en los niveles de ozono, provocando en los habitantes el aumento de afectaciones respiratorias, como asma y reacciones alérgicas, y también afectaciones cardíacas, entre otras. De igual forma, la exposición a altas temperaturas incrementa el riesgo de hospitalizaciones por golpes de calor e incluso muerte.

Existen varios métodos para el estudio del fenómeno de las ICU, como puede ser el uso de percepción remota (PR), la obtención de datos de estaciones meteorológicas, la obtención de datos de entidades calificadas y el estudio in situ donde se utilizan cámaras térmicas portátiles, entre otros (Manzanilla-Quiñones, 2022). A veces se adopta más de uno de los métodos mencionados para complementar la información tanto a nivel atmosférico, como a nivel de superficie. La variedad de recursos permite el acceso a datos obtenidos durante el día y la noche en diferentes épocas del año para poder compararlos y cuantificar los efectos de los fenómenos presentados.

Las ciudades, junto con sus habitantes y gobiernos, son actores fundamentales del esfuerzo global para el clima y el desarrollo sostenible de las ciudades, por lo que es muy importante la planeación urbana integrando la mayor cantidad posible de áreas verdes y considerando la adecuada selección de las especies vegetales para el sitio. El uso e implementación de áreas verdes urbanas es una de las formas más efectivas de mitigar las ICU. La vegetación no solo mejora el aspecto visual de las vialidades y espacios, captura el carbono emitido por las diversas fuentes y libera oxígeno; sino que también tiene un papel fundamental en la reducción de la temperatura. La temperatura registrada en áreas verdes es por lo menos de 1°C a 2°C menor a la de las áreas no vegetadas que las rodean. El efecto de enfriamiento de las áreas verdes urbanas se logra, principalmente, por la sombra que generan los árboles y la evapotranspiración de la vegetación.

En el caso de la CDMX, tres cuartas partes de sus habitantes consideran un rasgo muy positivo el hecho de que sus viviendas se encuentren cerca de parques y jardines, ya que contrasta con la ausencia de árboles y vegetación en gran parte del tejido urbano. Actualmente, menos de la mitad de las manzanas de la Ciudad tienen árboles en todas sus calles, es por eso por lo que se presenta una gran disparidad entre las alcaldías. En algunas de ellas el porcentaje de manzanas con árboles en todas sus calles es igual al 60%, como en Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Azcapotzalco y Coyoacán; en otras, la proporción es menor al 20%, como en La Magdalena Contreras, Xochimilco y Milpa Alta. De igual forma, es importante

mencionar que la mayor parte del suelo de conservación se concentra en las alcaldías del sur de la Ciudad (EVALUA, 2020).

En el Capítulo 1 se hace un recuento histórico de los primeros estudios del medio físico de las ciudades y de los términos designados a los fenómenos climatológicos. Se abarca, a grandes rasgos, las primeras aportaciones importantes de autores en el campo de la climatología y también se menciona como fueron evolucionando los estudios climatológicos en el ámbito de las zonas urbanas. Se explica desde los primeros estudios aplicados para identificar el fenómeno de *ICU*, hasta los modelos fisicomatemáticos aplicados hoy en día para predecir el comportamiento del fenómeno en un lugar en específico.

En el Capítulo 2 se enuncian los estudios más recientes relacionados con las *ICU* en México y, de manera más específica, en la CDMX para tener una referencia de lo ya estudiado en el país y los resultados obtenidos hasta el momento. Los datos presentados son un punto de partida para compararlos con los resultados obtenidos de este trabajo de investigación, es decir, evaluar la evolución y el impacto de la temperatura y de las áreas verdes en la Ciudad.

En el Capítulo 3 se dan a conocer de manera detallada los conceptos básicos para comprender los términos utilizados en la metodología y a lo largo del trabajo de investigación.

En el Capítulo 4 se enuncia la metodología del trabajo de investigación. Se comienza por dar a conocer de forma detallada el sitio de estudio. Se presentan datos como la ubicación, orografía, población, viento, climatología y las temperaturas máximas, mínimas y medias anuales, así como una explicación general de la calidad del aire. Posteriormente, se dan a conocer las plataformas seleccionadas para obtener los datos e imágenes con los que se trabajó, así como también la plataforma con la que se procesaron las imágenes, se obtuvieron los resultados y se elaboraron los mapas correspondientes para la presentación de los resultados.

En el Capítulo 5 se presentan los datos e imágenes recabadas de las plataformas mencionadas en el capítulo anterior, para después explicar detalladamente los resultados obtenidos después de procesarlas. En este capítulo se busca darle respuesta al objetivo principal de este trabajo mediante el análisis de resultados, es decir, comprobar la existencia del fenómeno de *ICU* en la CDMX mediante la observación y procesamiento de imágenes satelitales, obteniendo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura Superficial Terrestre (LST). De igual forma, se muestran algunos puntos de interés con vegetación donde se demuestra el efecto contrario al de la *ICU*. Al final de este capítulo se enuncian métodos, sugerencias y recomendaciones para la mitigación del fenómeno en zonas urbanas, pero sin aplicarlos a los puntos de interés.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones finales a las que se llegaron a lo largo de todo el trabajo de investigación.

Capítulo 1. Estudios de climatología a lo largo del tiempo: Antecedentes

Desde el siglo pasado se documentó un drástico crecimiento urbano en las ciudades del mundo, lo que permitió que los estudios de climatología avanzaran en gran medida paralelamente a este crecimiento. El interés por el medio físico de las ciudades, principalmente, por el del clima urbano, ha sido cada vez más importante porque se busca conocer que los habitantes de las ciudades vivan agradablemente, sino también analizar, comprender y explicar qué suponen las modificaciones y dar a conocer las repercusiones que pueden tener en el clima y temperatura urbanos.

Los primeros estudios climatológicos se realizaron en el rubro de la contaminación del aire y la primera publicación con un estudio completo sobre el tema se publicó en 1661 por John Evelyn. Cerca de 200 años más tarde, surgió un gran interés generalizado por el estudio de los efectos de la temperatura, particularmente por el de la temperatura en zonas urbanas.

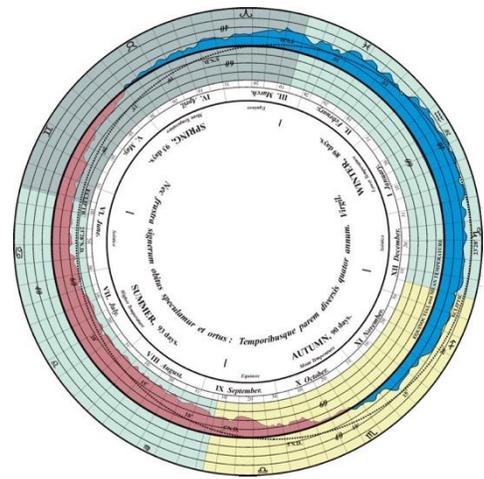


Figura 1. Representación gráfica del ciclo anual de la temperatura en la publicación *The Climate of London*. Las líneas concéntricas representan una escala de temperatura con intervalos de 5°F. El recorrido e inclinación del sol se muestran con una línea punteada. Las zonas en rojo y azul definen los períodos cálido y frío, respectivamente. El ciclo está dividido en 4 porque cada color representa a una estación del año. Redibujada de *The Climate of London*. Mills, 2008.

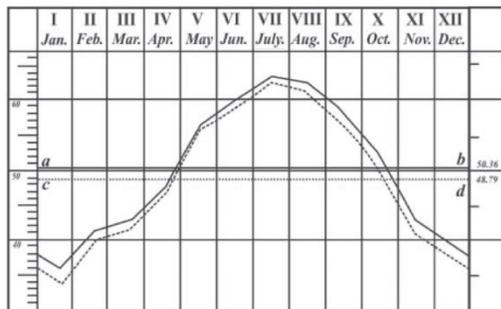


Figura 2. Curvas de temperatura anuales para zona urbana y rural. La gráfica representa la temperatura anual de la ciudad (línea continua) y la de la zona rural (línea punteada). Las líneas horizontales representan el promedio de temperatura para la ciudad (a - b) y para la zona rural (c - d), esto basado en el estudio de 30 años en el período de 1797 a 1816. Redibujada de *The Climate of London*. Mills, 2008.

Las referencias bibliográficas más antiguas relacionadas a la modificación de la temperatura en las ciudades debido a la urbanización datan del siglo XIX, específicamente del año de 1818 cuando el científico inglés Luke Howard realizó los primeros estudios de este tipo en la ciudad de Londres, dando origen a la publicación de su libro *The Climate of London* (figuras 1 y 2). Otro investigador que realizó grandes aportaciones a este tema de manera temprana fue Emilien Renou, quien en el año de 1868 publicó un estudio similar al de Howard, pero realizado en París. Ambos autores expusieron las diferencias entre las altas temperaturas observadas en la ciudad y la diferencia con las temperaturas presentadas en las zonas rurales aledañas a esta. Howard atribuyó que las temperaturas más altas en los centros

urbanos se debían al uso del carbón como combustible para la generación de calor en los hogares y a su uso industrial, mientras que Renou concluyó que la diferencia de temperaturas

entre las zonas rurales y las ciudades podía llegar a ser de hasta 1°C. A este contraste de calor entre las ciudades y las zonas rurales cercanas es nombrado *Isla de Calor Urbana* (Urban Heat Island), un término acuñado en el año de 1958 por el inglés Gordon Manley que hoy en día sigue en uso.

Durante la década de 1950 y principios de los 60, algunos investigadores publicaron trabajos teóricos que hasta hoy se mencionan en los estudios de la modificación del campo térmico en las ciudades. Algunos de estos trabajos son: *Local Climatological Studies of The Temperature Conditions in an Urban Area*, publicado en 1950 por Sundborg en Uppsala, Suecia; *The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients*, publicado en 1954 por Duckworth y Sandberg en California, EUA; *The Temperature of Cities*, publicado en 1961 por Mitchell en Washington D.C., EUA; entre otros. En 1970, Helmut Landsberg publicó *Man-Made Climate Changes* donde explica de forma concreta las variaciones de temperatura debidas a la urbanización. Adicional a estos autores y dentro de la misma línea de estudios de carácter teórico destacan también aportaciones de autores rusos, así como de autores japoneses quienes tuvieron grandes aportaciones en estudios aplicados de climatología urbana debidos al gran crecimiento de Tokio durante esa época. El principal interés de los autores japoneses en sus estudios fue la distribución espacial de la temperatura en los puntos de estudio considerados y sus variaciones.

Como se mencionó anteriormente, en 1958 se acuñó el término *isla de calor urbana (ICU)*, por lo que en los años siguientes varios autores publicaron trabajos relacionados con el tema en concreto dentro de la climatología. Algunos se dedicaron a explicar más a detalle el fenómeno, aunque otros se enfocaron en analizar su aparición en casos específicos como, por ejemplo, en el caso de ciudades pequeñas o en ciudades recientemente construidas. Un autor con una contribución muy destacada en este tema es Timothy Richard Oke, quien en 1973 planteó la íntima relación entre el fenómeno de *ICU* y el tamaño de la ciudad estudiada, tomando el número de habitantes como indicador del tamaño de la ciudad. Este estudio lo replicó en varias ciudades para comprobarlo, por lo que su aportación es una referencia obligada en cualquier estudio sobre islas de calor en una ciudad. De igual forma, en las décadas de los años 70 y 80 otros autores realizaron varios estudios aplicados en una o varias ciudades en particular de países americanos como Estados Unidos y Canadá; europeos como Inglaterra, Italia, Francia y Polonia; y asiáticos como Japón e India. Estos últimos trabajos mencionados se enfocaron, especialmente, en la intensidad, forma y configuración de la *ICU*, así como en sus variaciones diarias y estacionales.

Con el fin de comprender los procesos producidos por el clima y la temperatura, y predecir los efectos de sus posibles cambios e interacciones, surgió la necesidad de proponer formulaciones fundamentadas física y matemáticamente dando origen a los modelos climáticos. A principios de los años 60 y partiendo de modelos numéricos de la atmósfera diseñados para predecir el tiempo a corto plazo, se desarrollaron los primeros modelos climáticos de la circulación general atmosférica, dando origen a los modelos de balance de energía, modelos radiativos – convectivos, modelos de circulación general, entre otros. Los modelos mencionados son

modelos climáticos globales o aludidos a escalas planetarias, sin embargo, la modelización climática permite aplicarlos en escalas más pequeñas. Así, el fenómeno climático – meteorológico de la ICU atrajo rápidamente la atención para su modelización. El primer trabajo de este tipo fue *An Urban Ventilation Model Applied to Montreal* publicado en 1964 por Peter W. Summers. Posterior a este primer modelo, varios autores publicaron otros modelos de tipo empírico, numérico y espaciales, como son: *A numerical model of the urban heat island*, publicado en 1969 por Myrup; *An empirical model using eigenvectors to calculate the temporal and spatial variations of the St. Louis heat island*, publicado en 1973 por Clarke y Peterson; *Simulating the casual elements of urban heat islands*, publicado en 1980 por Terjung y O'Rourke; *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations*, publicado en 1981 por Oke, entre algunos otros.

Debido a la presencia del fenómeno de ICU, se origina otro fenómeno llamado convección urbana, el cual es caracterizado por la formación de nubosidad y precipitación en las ciudades. Este fenómeno está íntimamente relacionado con el estudio de la estructura de la capa límite urbana (urban boundary layer), es decir, con la porción de la capa límite que va desde la parte más alta de los edificios hasta un nivel por debajo de estos donde las características meteorológicas se ven modificadas por la presencia de las actividades y materiales comúnmente utilizados en las ciudades. Algunos investigadores ya mencionados anteriormente, como Clarke (1969, 1978) y Oke (1971, 1976), y algunos otros como Clark et al. (1985), Kalma (1974), DeMarrais (1975), Viskanta (1977), Sorbjan (1978) y Surridge-Goldreich (1988), entre otros, se interesaron por conocer la estructura de la capa límite urbana, sus características dinámicas, la relación con la ICU, así como sus manifestaciones nocturnas debido al cambio de temperaturas en los materiales y el calor antropogénico generado durante la noche. En *The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands* publicado en 1976, Oke distinguió un nuevo nivel atmosférico dentro de la capa límite urbana denominado *urban canopy layer*, el cual se define como el sector entre las estructuras de los edificios con características microclimáticas inferidas por sus alrededores inmediatos.

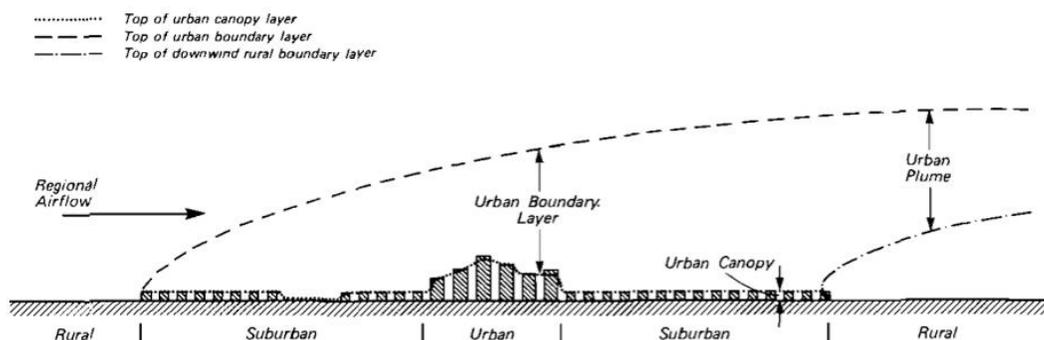


Figura 3. Representación esquemática de la atmósfera urbana que ilustra la clasificación de la modificación térmica de dos capas. Oke, 1976.

Como se mencionó en el párrafo anterior, el calor antropogénico influye en la formación de las *islas de calor*. Este calor proviene de los procesos de combustión urbanos, como los sistemas de calefacción domésticos, el transporte, el alumbrado y el uso de energía en la industria, entre otros. El calor antropogénico es un factor determinante para obtener el balance energético de una ciudad, por lo que varios autores han estudiado el balance energético en diversas ciudades y áreas urbanas desde los años 60 hasta la actualidad, como son Craddock (1965), Garnett y Bach (1965), Nakamura et. al (1973), Yap y Oke (1974), Núñez y Oke (1977 y 1980), Oke (1980), Harrison y McGoldrick (1981) y Oke et. al. (1981), entre otros.

Otro de los elementos meteorológicos que afectan la intensidad de las *islas de calor* es el viento, por lo que existen estudios en los que se busca conocer la distribución del viento en las zonas urbanas en relación con la *ICU* como, por ejemplo, *Surface breeze effects of Leicester's heat islands*, publicado en 1961 por Chandler; *A theoretical study of the St. Louis heat island: the wind and temperature distribution*, publicado en 1976 por Vukovich et. al.; *Some features of a surface wind system associated with the Tokyo heat island*, publicado en 1980 por Fujibe y Asai; entre otros.

Además de los factores ya mencionados anteriormente que influyen en la formación de las *islas de calor*, algunos autores han comprobado que, la presencia de la contaminación atmosférica también contribuye a que ocurra el fenómeno con mayor o menor intensidad. Algunos de los trabajos relacionados con este tema son: *An advective model for predicting air pollution within an urban heat island with applications to New York City*, publicado en 1972 por Leahey; *Pollutant concentration and stratification in urban heat island*, publicado en 1975 por Nkendirim et. al.; *Radioactive effects of elevated pollutant layers on temperature structure and dispersion in an urban atmosphere*, publicado en 1980 por Viskanta y Daniel; *Modelling of the urban heat island and of its relation with pollution dispersal*, publicado en 1982 por Bennett y Saab; entre otros.

En relación con el presente trabajo de investigación, es importante mencionar que las técnicas de percepción remota para el estudio y delimitación de la *ICU* se han implementado cada vez más con el paso de los años. El primer estudio de este tipo fue *Remote sensing of urban 'heat islands' from an environmental satellite*, publicado en 1972 por Rao. Posteriormente, de 1973 a 1974 Tsuchiya publicó tres trabajos relacionados con el uso de percepción remota para identificar la temperatura de la superficie terrestre en la ciudad de Tokio. Otros autores con publicaciones relacionadas con el uso de esta tecnología y las *islas de calor* son Sekiguti y Tamiya, quienes juntos hicieron comparaciones de zonas urbanas y rurales en ciudades japonesas en el año de 1978. En la actualidad el uso de la percepción remota complementa de gran manera el estudio de las *ICU* a nivel mundial debido al fácil acceso a las bases de datos de las misiones de los satélites operados por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) o la EUSPA (European Union Agency for the Space Programme), por lo que las publicaciones de este tipo han aumentado desmedidamente desde los años 80 hasta el siglo actual.

Con el tiempo, se observan y registran más estudios y publicaciones en ciudades europeas, asiáticas y algunas norteamericanas, dejando a las ciudades latinoamericanas y de los otros

continentes en desventaja respecto al conocimiento del fenómeno de *ICU* en sus ciudades, pero con una gran área de oportunidad para estudiarlo en zonas con características climatológicas diferentes a las estudiadas, y con distintos tamaños, demografía, estilos de vida, materiales de construcción y distribución de vialidades y áreas verdes.

Capítulo 2. México y sus estudios de climatología: Estado del arte

Como se comentó anteriormente, México es un país en donde la mayoría de su población reside en ciudades por lo que el estudio de sus habitantes en zonas urbanas en conjunto con su entorno es de suma importancia. Por la mala planeación urbana de la mayoría de las ciudades del país, es evidente el predominio de zonas cubiertas de concreto y asfalto, así como la carencia de áreas verdes y cuerpos de agua, lo que genera un notable aumento de la temperatura en algunas zonas y una gran concentración del calor urbano.

A pesar de que la presencia de las *ICU* es uno de los fenómenos climatológicos más estudiados a nivel mundial, en el año 2022 en México tan solo 10 de las 50 ciudades más pobladas del país (ciudades con una población mayor a 340,000 habitantes) contaban con estudios sobre *ICU*. En los últimos 30 años solo han sido publicados 20 artículos científicos relacionados con este fenómeno en el país, siendo el pionero Ernesto Jáuregui con su publicación *Heat Island Development in Mexico City* en 1997. De estos 20 artículos mencionados, el 55% utilizaron datos climáticos de estaciones meteorológicas para obtener sus resultados, el 25% utilizaron técnicas de percepción remota, el 10% sensores térmicos y el otro 10% otras técnicas como la modelación dinámica y el análisis de la vegetación presente en la zona.

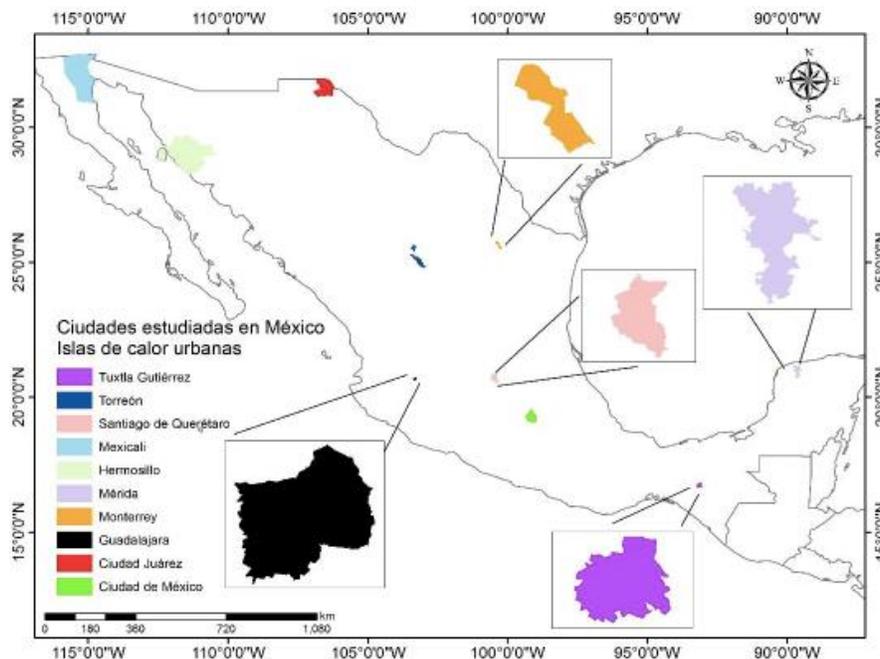


Figura 4. Ciudades con población mayor a 340,000 habitantes con estudios de ICU en México. Manzanilla-Quiñones, 2022.

En ciudades del norte del país (Hermosillo, Ciudad Juárez y Tampico) se presentan diferencias de temperatura de áreas urbanas y rurales promedio de 4.9°C, en el sureste del país (Tuxtla Gutiérrez) se han encontrado diferencias de hasta 5°C, mientras que en ciudades como Toluca y Querétaro se han presentado diferencias de 3°C y 5°C, respectivamente.

Durante un año (1994-1995), Ernesto Jáuregui en su publicación *Heat Island Development in Mexico City* recabó datos de las temperaturas de la Ciudad de México haciendo uso de cuatro estaciones meteorológicas automáticas, dos colocadas en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, una en el Palacio de Minería en Tacubaya y otra más en Texcoco, esta última fungiendo como la estación control en una zona rural. Además de estas cuatro estaciones, también se usaron datos obtenidos del sensor de temperatura de mercurio del Observatorio de Tacubaya. De las observaciones y conclusiones de este trabajo considero muy importante mencionar cinco puntos principales:

1. Las islas de calor nocturnas fueron las más frecuentes y con mayor intensidad en la CDMX. Se presentaron con mayor frecuencia durante las temporadas secas. Esto contrastó con lo sucedido en estudios previamente realizados en latitudes medias, donde las diferentes tasas de enfriamiento urbano-rural produjeron un contraste térmico máximo a medianoche.
2. Durante la temporada de lluvias, los factores más importantes que rigieron en el desarrollo de las *ICU* fueron los cambios de velocidad en el viento, la nubosidad y la lluvia (particularmente en zonas rurales), factores asociados con un clima inestable y turbulento. Las *islas de calor* diurnas que se registraron en la temporada húmeda fueron generalmente menos intensas (3 – 5°C) y con una duración corta a comparación con las de otras épocas del año.
3. Durante el año de observación, las *islas de calor* de la tarde/noche se presentaron con una frecuencia del 12%, tuvieron una intensidad promedio de 4 – 5°C y la probabilidad de ocurrencia durante las temporadas secas o húmedas fue la misma.
4. La formación de las *ICU* que se presentaron por la tarde y en un período lluvioso comenzaba alrededor de la puesta de sol, alcanzando un máximo cerca de la media tarde para luego disminuir hasta un mínimo alrededor de la media noche. Su ocurrencia puede estar regulada por las lluvias en zonas rurales.
5. Es posible que la posición de los sensores en la zona urbana aumentara las mediciones de la temperatura tomadas durante el día debido a que los tejados actúan como fuentes de calor elevadas. Sakaida y Suzuki (1994) demostraron que las temperaturas del aire de la tarde a 3 metros sobre el nivel del techo son aproximadamente 2°C más altas que a 2 metros sobre el nivel de la calle.

En el año de 1999 T.R. Oke, junto con E. Jauregui y otros autores realizaron el estudio del balance de energía en la CDMX durante la temporada seca, encontrando que las mediciones del balance energético en el centro de la CDMX durante esa época demuestran un entorno influenciado principalmente por el calor sensible. De forma específica, demostraron que durante el día los edificios absorben una cantidad significativa de calor y es liberada durante la noche. La absorción de calor durante el día es lo suficientemente grande como para que se reduzca la transferencia de calor convectivo, similar a áreas urbanas menos desarrolladas y con mayor humedad. En la noche, el calor almacenado es liberado generando un flujo de calor sensible convectivo débil. El centro de la CDMX y, en general, casi toda la Ciudad, representa un entorno extremo caracterizado por la sequedad, materiales de construcción densos y una gran área superficial. En un inicio se pensó que estos atributos permitirían hacer una generalización a partir de los sitios urbanos menos desarrollados, pero la hipótesis fue incorrecta. Este estudio permitió concluir que factores como la disponibilidad de agua, el área superficial y las propiedades térmicas de los materiales utilizados para la construcción interactúan de manera compleja.

Como otras referencias de resultados de estudios recientes realizados en la Ciudad de México, en el 2015 Colunga et. al. comprobaron una diferencia de temperatura de verano en las zonas urbanas y rurales de hasta 5°C, mientras que, en el año 2016, Ballinas y Barradas encontraron una *ICU* de 7.1°C en la colonia Escandón. Comparando estos últimos resultados con los primeros estudios realizados de *ICU* en la CDMX, dicho aumento es ocasionado principalmente por el crecimiento poblacional y el desarrollo urbano, pero con el paso del tiempo se mantiene el conocimiento de que los materiales utilizados para la construcción, la disponibilidad de agua y las modificaciones al área superficial urbana interactúan entre sí e influyen de manera significativa en los efectos de la temperatura de la Ciudad.

Capítulo 3. Marco teórico

Percepción remota

La percepción remota es detectar y monitorear las características físicas de un área determinada midiendo la energía reflejada y emitida a una distancia específica, normalmente mediante satélites, aeronaves o, actualmente, vehículos aéreos no tripulados (UAV, drones; USGS, 2024). Dependiendo de lo que se desee estudiar, se debe elegir el sensor correspondiente, es decir, es necesario definir las restricciones de vuelo, resolución espectral, resolución espacial de las imágenes y cobertura para elegir el sensor que mejor conviene según el estudio que se esté realizando.

Cuando se habla de la resolución espacial de las imágenes se refiere al tamaño de la característica más pequeña que puede detectar un sensor en el suelo, esta se mide en metros o kilómetros por píxel. Por ejemplo, un sensor con una resolución espacial de 10 metros puede distinguir objetos que estén al menos a 10 metros de distancia. Al tener una resolución espacial mayor, significa más detalles y claridad en las imágenes, pero también más datos y almacenamiento. Ahora bien, cuando se habla de resolución espectral se refiere al número y ancho de las bandas espectrales registradas por un sensor. Cada banda corresponde a un rango de longitudes de onda del espectro electromagnético, como luz visible, infrarrojo o microondas. Las diferentes bandas revelan información diferente sobre las características de la superficie, la vegetación, el agua o la atmósfera. Una mayor resolución espectral significa más bandas disponibles y mayor diversidad, pero también más complejidad y ruido. Al comparar la resolución espacial y espectral de diferentes sensores, es necesario considerar las compensaciones y las aplicaciones. En general, hay equilibrio entre resolución espacial y espectral, un sensor con resolución espacial alta suele tener una resolución espectral baja y viceversa, esto por las limitaciones del diseño del sensor, la transmisión de datos y la capacidad de almacenamiento.

Los datos recabados mediante percepción remota permiten determinar la composición y naturaleza de la superficie terrestre y de la atmósfera desde escalas locales hasta globales, así como evaluar los cambios mediante el análisis de imágenes capturadas en diferentes momentos. De esta manera, la percepción remota es útil para proporcionar información espacial que de otra forma sería difícil o imposible de obtener. Entre las aplicaciones de los datos recabados mediante percepción remota incluyen estudios de población y demografía, estudios de sitios arqueológicos, estudios energéticos utilizando modelos hídricos, planeación urbana, monitoreo ambiental, planificación del uso y cobertura del suelo, pronóstico del tiempo y estimación de la producción agrícola, entre otros. En estos estudios es común integrar datos obtenidos mediante sensores remotos con otros conjuntos de datos utilizando sistemas de información geográfica (SIG) para realizar análisis espaciales. Hoy en día, los drones están revolucionando la forma de capturar imágenes terrestres, sin embargo, los métodos tradicionales (misiones satelitales) siguen siendo de gran importancia. Sentinel, Landsat y

MODIS son actualmente los sensores remotos más utilizados para la aplicación de percepción remota, pero para este trabajo ahondaremos más en Sentinel y en Landsat ya que, al ser misiones similares, permiten hacer comparaciones con sus bandas disponibles, las imágenes obtenidas y sus diferentes resoluciones. Los sensores Landsat tienen una resolución espacial de 15 a 60 metros, según la banda, mientras que la resolución espacial de los sensores Sentinel va de 10 a 60 metros, según la banda y el modo. Los sensores Landsat tienen de 8 a 11 bandas y cubren las regiones visibles, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico. Los sensores Sentinel tienen de 13 a 25 bandas y cubren las regiones visibles, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y microondas.

Para elegir el sensor que mejor se adapta a lo requerido en algún proyecto en específico, es importante saber qué tipo de información se quiere extraer de las imágenes y qué escala y frecuencia se necesita. Por ejemplo, si se requiere monitorear cambios o anomalías a escala local, es recomendable un sensor con una alta resolución espacial pero una baja resolución espectral, como Landsat. Si se desea combinar diferentes tipos de información o detectar características que no son visibles en otras bandas, es recomendable un sensor con una resolución espacial moderada pero una resolución espectral alta, como Sentinel. En las tablas 1 y 2 a continuación se muestran de forma específica las características de algunas de las misiones de los sensores mencionados anteriormente.

Tabla 1. Características misión Sentinel 2. Elaboración propia con datos de ESA, 2024.

Sentinel 2			
Número de banda	Banda espectral	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol	443	60
2	Azul (B)	490	10
3	Verde (G)	560	10
4	Rojo (R)	665	10
5	Infrarrojo cercano (NIR)	705	20
6	Infrarrojo cercano (NIR)	740	20
7	Infrarrojo cercano (NIR)	783	20
8	Infrarrojo cercano (NIR)	842	10
8a	Infrarrojo cercano (NIR)	865	20
9	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	940	60
10	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1375	20
11	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	1610	20
12	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	2190	20

Tabla 2. Características de las misiones Landsat 8 y 9. Elaboración propia con datos de USGS, 2024.

Landsat 8-9			
Número de banda	Banda espectral	Longitud de onda central (mm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol costero	0.43-0.45	30
2	Azul (B)	0.45-0.51	30
3	Verde (G)	0.53-0.59	30
4	Rojo (R)	0.64-0.67	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	30
6	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.57-1.65	30
7	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.11-2.29	30
8	Pancromática	0.50-0.68	15
9	Cirrus	1.36-1.38	30
10	Infrarrojo térmico (TIR) 1	10.6-11.19	100
11	Infrarrojo térmico (TIR) 2	11.50-12.51	100

Como se mencionó anteriormente, los datos captados por los satélites de percepción remota se registran en diferentes bandas del espectro electromagnético, generando una imagen monocromática que se puede visualizar en escala de grises con una paleta de 256 tonos. Por lo que cada píxel de la imagen puede contener un valor que oscila entre el negro (valor 0) y el blanco (valor 256), como se muestra en la imagen a continuación.

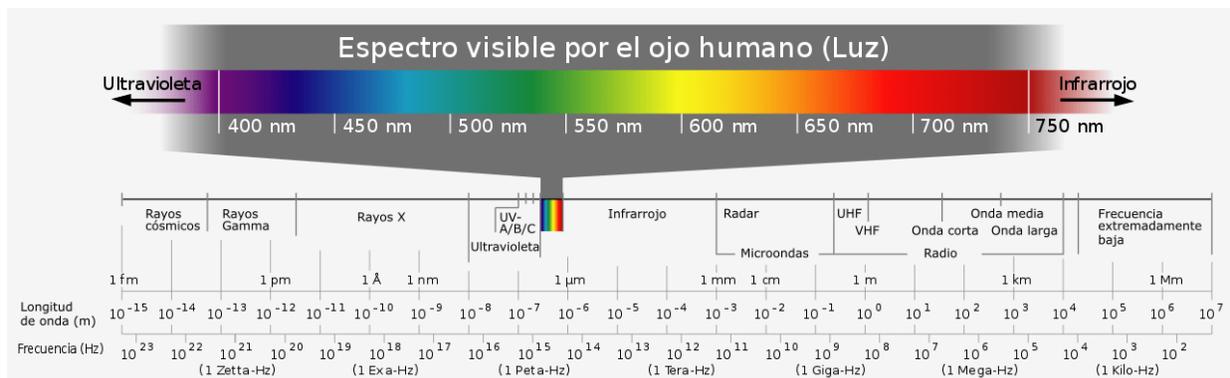


Figura 5. Espectro visible por el ojo humano. MappingGIS, 2020.

La visualización de una imagen satelital es más representativa cuando se realiza con una composición de colores, ya que el ojo humano percibe mejor las diferencias de color que los tonos grises. Para visualizar las imágenes satelitales en colores percibidos por el ojo humano, es necesario realizar combinaciones de bandas cuyo resultado se conoce como *imagen de color compuesta*. El máximo de bandas utilizadas por composición es tres y el resultado depende de las bandas espectrales asignadas a los canales rojo, verde y azul de un monitor. Las

composiciones permiten visualizar, simultáneamente, información de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas. La posibilidad de realizar composiciones de bandas es prácticamente ilimitada, pero solo algunas composiciones tendrán un interés específico para alguna aplicación específica. Los SIG facilitan hacer la combinación de las bandas mediante la renderización de las bandas, como QGIS.

Algunas de las combinaciones de bandas y algoritmos más utilizadas son los siguientes:

Color verdadero (RGB)

Al combinar las bandas rojo (R), verde (G) y azul (B) se obtiene una imagen de color verdadero cuyo propósito es mostrar la imagen de la misma forma que nuestros ojos ven el mundo. Para Landsat 8 y 9 se combinan las bandas 4 (R), 3 (G) y 2 (B).



Figura 6. Imagen RGB. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Falso color para detección de zonas urbanas

Al combinar las bandas 7, 6 y 4 en Landsat 8 y 9, es decir, las bandas SWIR (7 y 6) y rojo (4) se obtiene una imagen de falso color que permite visualizar las zonas urbanas en tonos magentas, mientras que las áreas vegetadas se muestran en tonos verdes, por ejemplo, las praderas o pastos se observan en tonos verdes claros, mientras que las áreas forestales se ven desde un verde olivo hasta un verde brillante.



Figura 7. Imagen de color verdadero. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, o NDVI por sus siglas en inglés es un indicador ambiental que se basa en la relación entre la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre en dos regiones del espectro electromagnético, luz roja e infrarroja (infrarrojo cercano). El NDVI tiene muchas aplicaciones, especialmente si se están realizando observaciones en distintas fechas. Mediante el análisis de estas series de tiempo se facilita el monitoreo de la vegetación y detección de cambios en la cobertura/uso del suelo, el seguimiento de estado de los cultivos agrícolas, la caracterización de la fenología de la vegetación y el seguimiento de fenómenos como la sequía. El indicador puede tomar valores en un rango de -1 a 1.

Tabla 3. Interpretación de valores de NDVI. Elaboración propia con datos de Toribio, 2019.

Valor de NDVI	Interpretación
-1 – 0	Vegetación muerta u objetos inanimados (nubes, nieve, rocas)
0 – 0.33	Vegetación escasa o enferma
0.33 – 0.66	Vegetación moderada o medianamente sana
0.66 – 1	Alta densidad de vegetación o vegetación muy sana

Para obtener el índice se efectúa la siguiente operación:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots (1)$$

Donde:

- NIR = Infrarrojo cercano
- RED = luz roja visible

Tomando en cuenta las bandas que corresponden al infrarrojo cercano y a la luz roja visible, la ecuación para Landsat 8 y 9 se expresaría como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} = \frac{B5 - B4}{B5 + B4} \dots (2)$$

Una vez realizado el cálculo del NDVI y obtenida la imagen procesada, se acostumbra cambiar las tonalidades de la imagen para tener una mejor percepción de los resultados, es decir, es común ver imágenes de NDVI con paletas de color verdes para indicar la vegetación, aunque eso no significa que la imagen obtenida tenga específicamente esas tonalidades, al contrario, el resultado original muestra solo tonalidades de grises.

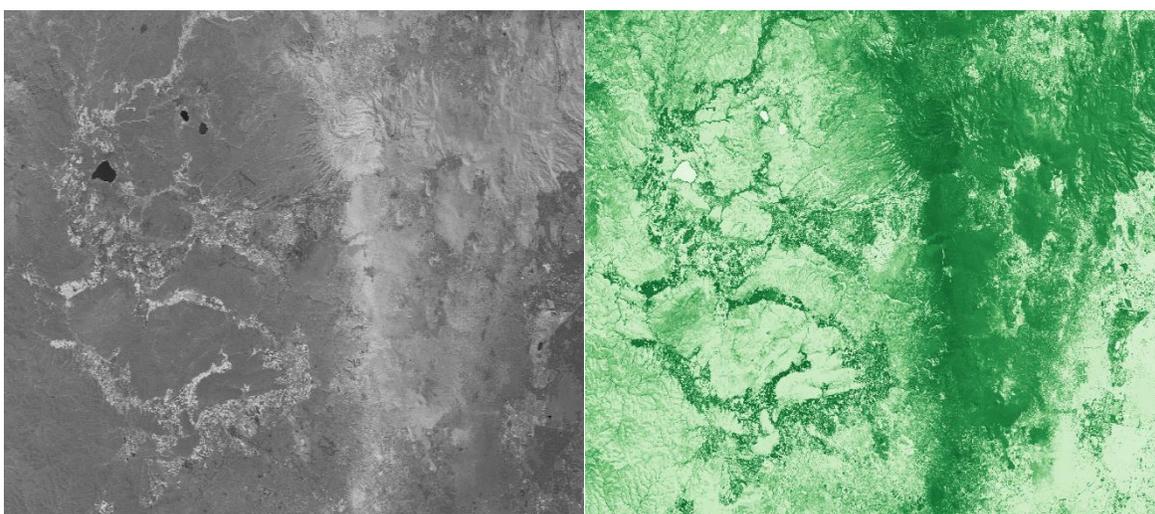


Figura 8. Imagen NDVI con paletas de color diferentes. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Temperatura Superficial Terrestre (LST)

La Temperatura Superficial Terrestre, o LST por sus siglas en inglés mide la emisión térmica desde la superficie terrestre donde la energía solar entrante interactúa y calienta el suelo, o la superficie del dosel en áreas con vegetación. La LST es una medida de qué tan caliente está la Tierra al tacto. Se diferencia de la temperatura atmosférica porque la Tierra se calienta y se enfría más rápidamente que el aire. Es un factor importante en muchos aspectos como el cambio climático, el uso y cobertura del suelo urbano, los estudios de equilibrio térmico y también significa un insumo clave para los modelos climáticos.

Para obtener la LST no se hace una combinación de bandas como en los casos mencionados anteriormente, sino que hay que aplicar una ecuación para calcularla. Existen varias ecuaciones para obtener esta temperatura, pero a continuación se enuncia la utilizada por el Semi-Automatic Classification Plugin en QGIS propuesta por Weng en el año 2004:

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda * \frac{T_B}{c_2}\right) * \ln e} \dots (3)$$

Donde:

- T_B : temperatura de brillo del satélite (K)
- λ : longitud de onda de la radiación emitida (mm)
- $c_2 = h * \frac{c}{s} = 1.4388 \times 10^{-2} mK$
- h : constante de Plank ($1.4388 \times 10^{-34} Js$)
- s : constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$)
- c : velocidad de la luz ($2.998 \times 10^8 \frac{m}{s}$)

Es importante mencionar que la LST solo se puede obtener cuando el sensor del satélite tiene bandas térmicas, es decir, las misiones Landsat permiten realizar este proceso, mientras que con las misiones Sentinel no es posible. Si se requiere aplicar el procedimiento con alguna misión de Sentinel tendría que aplicarse con la misión más reciente, es decir, Sentinel-3 ya que sí tiene acceso a bandas térmicas.

Al igual que con las imágenes obtenidas para NDVI, en las imágenes de LST también se acostumbra cambiar las paletas de color para tener una mejor percepción de las temperaturas obtenidas.

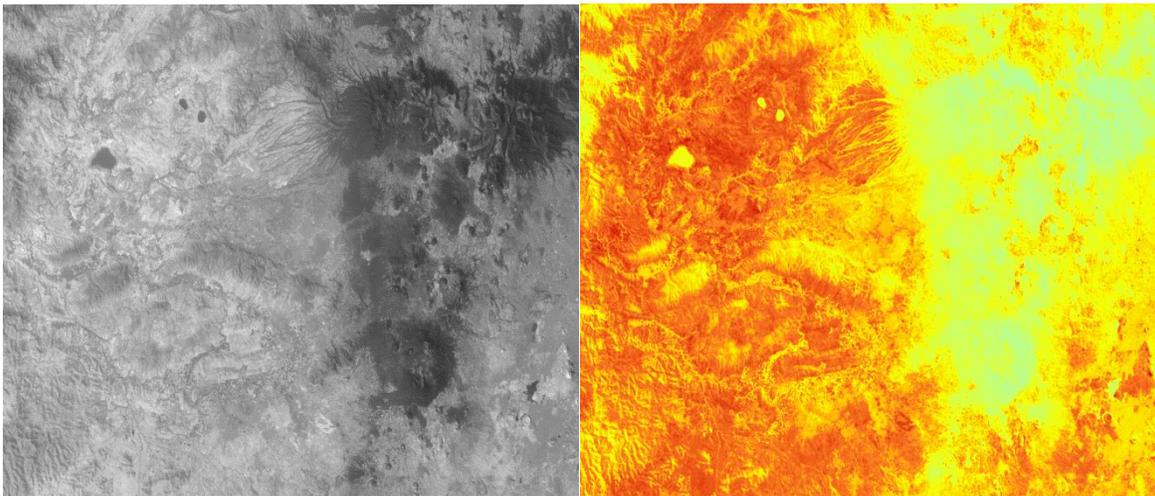


Figura 9. Imagen de LST con paletas de color diferentes. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Islas de Calor Urbanas

Las *ICU* ocurren cuando en las zonas urbanas se presentan temperaturas más altas que en las zonas rurales o suburbanas aledañas a ellas. Esta diferencia de temperaturas se debe en parte a variables controlables, como la expansión de la superficie urbana en donde los elementos naturales han sido reemplazados por materiales que tienen una mayor capacidad para absorber, retener y emitir calor como son los pavimentos, banquetas, fachadas de edificios, entre otros. Así como también el crecimiento poblacional, el calor antropogénico generado y la cantidad de áreas verdes disponibles, entre otras.

Este fenómeno también se presenta por variables que no son controlables, como son el porcentaje de nubosidad que se presenta en el día, la ubicación de la ciudad (latitud y longitud), las estaciones del año, las condiciones anticiclónicas, la velocidad del viento o las condiciones diurnas. Las variables no controlables junto con la radiación solar y las mencionadas variables controlables es lo que da origen a las *ICU*. En otras palabras, según se modifica el paisaje natural de una ciudad, el calor en las áreas urbanizadas se transforma significativamente y se intensifica el aumento de temperatura en la zona urbana con respecto a la rural, lo que se puede considerar un cambio climático local o regional. En la *figura 10* a continuación se muestra un diagrama donde se observa la interacción de las diferentes variables para la generación de las *ICU*.

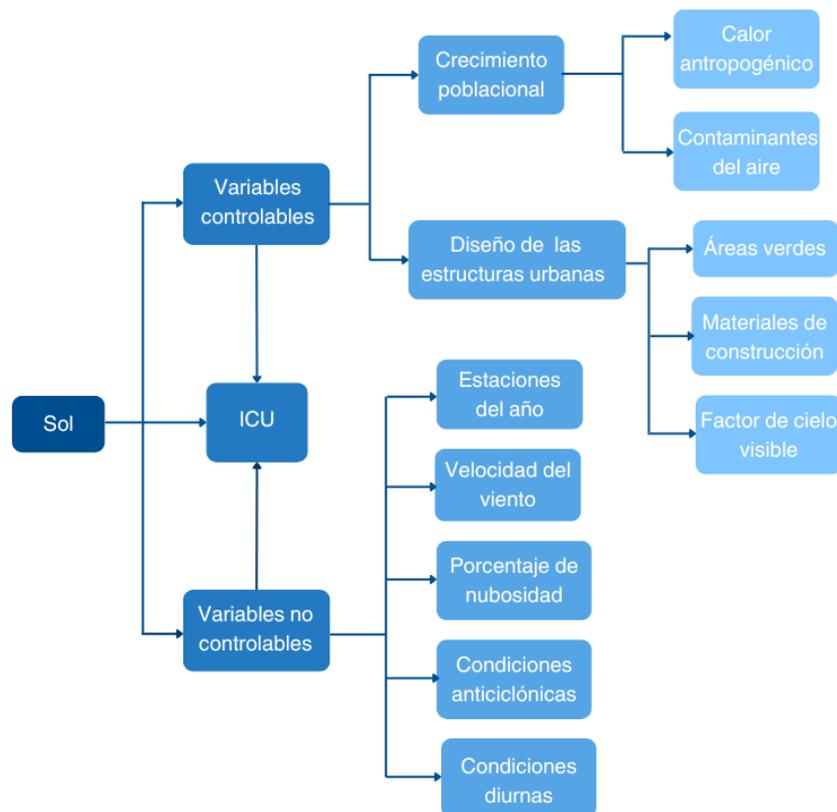


Figura 10. Generación de la *ICU*. Elaboración propia con datos de Rizwan et al., 2008.

Los efectos de las *ICU* afectan a dos partes: a los habitantes de las ciudades y al medio ambiente. En el caso de los habitantes, el aumento de la temperatura urbana disminuye el confort térmico, compromete a la salud pública, aumenta los índices de mortalidad por golpes de calor y aumenta el consumo de energía de los habitantes. Además, al aumentar las concentraciones de ozono a nivel del suelo debido a la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos volátiles (COV), se propicia la formación de smog y, en general, una calidad del aire poco favorable para los habitantes, haciendo que las afectaciones cardiovasculares se vuelvan más recurrentes. Ahora bien, en cuanto al medio ambiente el aumento de la temperatura afecta las condiciones climáticas regionales, es decir, puede ser que se presenten tormentas de manera más frecuente, inundaciones repentinas, olas de calor y alteraciones en la circulación de viento y en los patrones de precipitación. Las variaciones climáticas de las *ICU* abarcan desde la deterioración del entorno en el que vivimos, el aumento de la demanda de energía, el aumento de los niveles de contaminantes del aire, el impacto del estrés entre los habitantes, hasta el riesgo de pérdidas humanas y materiales.

En varios estudios se ha establecido que las *ICU* tienen efectos más notables durante la noche o, incluso, que este fenómeno es solamente nocturno, pero en el caso de la Ciudad de México no es aplicable esta teoría, ya que en algunas zonas de la Ciudad se llegan a presentar diferencias de temperatura de hasta 10°C entre zonas urbanizadas y zonas rurales durante todo el día.

Energía

El calor generado y contenido en un área urbana se puede calcular mediante la Ecuación de Balance de Energía Superficial Urbana (EBSU) propuesta por Oke en 1988:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \dots (4)$$

Donde:

- Q^* : radiación neta
- Q_F : flujo de calor antropogénico
- Q_H : flujo de calor sensible
- Q_E : flujo de calor latente
- ΔQ_S : flujo de calor almacenado en la superficie
- ΔQ_A : flujo de calor advectivo

Los términos del lado derecho de la ecuación son las entradas de energía en el sistema de dosel urbano. La radiación neta (Q^*) representa tanto la radiación de onda corta, como la de onda larga capturadas en un área específica, es decir, es el balance radiactivo entre la radiación solar e intercambios de infrarrojo y, comúnmente, se obtiene un valor positivo en el día y uno negativo en la noche. Cuando se trabaja en zonas urbanas, adicional a la Q^* , se tiene un flujo de calor

antropogénico (Q_F) provocado por las actividades humanas, como el uso de automóviles, aire acondicionado, calefacción, industrias, entre otros factores. El valor de Q_F se puede obtener al investigar el consumo de energía, o al utilizar modelos de energía en edificios y transporte, pero debido a la falta de información precisa, por lo menos en el caso de las ciudades mexicanas, se opta por omitir el cálculo de ese flujo de calor ya que su contribución no es muy grande. También es común omitir el calor advectivo (DQ_A), por lo que se obtiene al flujo de calor de almacenamiento (DQ_S) como residuo de los otros flujos medidos (Q^* , Q_H y Q_E), que regularmente es el modelo usado por diferentes investigadores del campo de la climatología urbana (García, et al. 2016).

Aunque en la mayoría de los casos se omita el término del flujo de calor de almacenamiento (DQ_S), cabe mencionar que este representa el almacenamiento de energía en los materiales de construcción de los edificios, en las calles pavimentadas o, en el suelo en general. Este flujo de almacenamiento es positivo en el día, pero en la noche es negativo.

El balance energético cambia dependiendo de la superficie que se está estudiando. Si la superficie tiene vegetación, cambiará el balance dependiendo del tamaño de las plantas, de su estructura vertical, de su distribución espacial y de su estado fenológico. También los bosques, pastizales y cultivos se comportan de forma diferente y varían dependiendo la época del año (Oke, 1978).

Temperatura atmosférica

La temperatura atmosférica se puede definir como la temperatura del aire que rodea al cuerpo humano, la cual es representativa del aspecto del entorno que determina el flujo de calor entre el cuerpo humano y el aire (Parsons, K., 2014). Existen varias técnicas utilizadas para medir la temperatura y estas se basan en diferentes fenómenos, como la termoelectricidad, la fluorescencia y las características espectrales, una variación de la resistencia de los conductores eléctricos dependiente de la temperatura, la expansión térmica, etc. (Childs, et al., 2000).

Para la medición de la temperatura atmosférica, la mayoría de los sensores se basan en principios operativos mecánicos y eléctricos. Los dispositivos mecánicos son en general baratos y confiables, pero normalmente solo se utilizan con fines de control directo y/o visualización más que para medición y seguimiento. En cambio, los sensores eléctricos tienen la capacidad de convertir el valor medido en una señal codificada digitalmente para comunicación directa con fines de control y medición. Los dispositivos eléctricos se basan principalmente en principios termoelectricos y de resistencia eléctrica (Ahmad et al., 2016).

La temperatura atmosférica es un componente fundamental en la investigación sobre el microclima, el entorno urbano y la salud ambiental, especialmente para definir las *ICU* (Leconte et al., 2017), el umbral de estrés por calor (Beckmann et al., 2021), eventos de salud (Williams et

al., 2012b; Xu et al., 2018), o la mortalidad (Curriero et al., 2002). Sin embargo, es difícil mapear en entornos urbanos debido a los fuertes gradientes de temperatura (Ho et al., 2014). La temperatura atmosférica generalmente se monitorea mediante estaciones meteorológicas estacionarias cerca del nivel del suelo, las cuales son instrumentos meteorológicos que incluyen un termómetro cubierto por escudos de radiación que proporcionan datos puntuales con alta frecuencia temporal, es decir, generalmente permiten tener registros horarios. Elegir los sitios de medición, los sensores, las telecomunicaciones y el formato de las bases de datos adecuados son esenciales para crear una red de estaciones meteorológicas que ofrezcan una variedad de datos fiables en diferentes sitios de un entorno urbano, aunque es muy probable que en cada punto de medición existan variaciones debido a las características distintas en cada punto. La variabilidad temporal y espacial de la temperatura del aire en las zonas urbanas puede explicarse por la variabilidad del nivel del mar, la densidad de carreteras y edificios, las variaciones en el *NDVI* (Szagri et al., 2023).

La *LST*, enunciada anteriormente, y la temperatura atmosférica difieren entre sí porque la *LST* mide qué tan caliente está la superficie terrestre al tacto, mientras que la temperatura atmosférica es aquella que el ser humano percibe en un lugar y momento determinado, es decir, difieren principalmente porque la superficie terrestre se enfría o calienta más rápido que el aire.

Objetivo

Comprobar la existencia del fenómeno de las Islas de Calor Urbanas en la Ciudad de México mediante el uso de la percepción remota, analizar sus efectos y proponer medidas de mitigación mediante la implementación de infraestructura verde, como corredores y azoteas verdes.

Capítulo 4. Metodología

Para el presente trabajo de investigación fue necesario seguir la siguiente metodología para llegar a los resultados planteados inicialmente.

1. **Identificación y descripción de la zona de estudio.** El sitio de estudio es la Ciudad de México, por lo que se enuncian características importantes del sitio que se relacionan con el estudio del fenómeno de ICU como son: la superficie total de la Ciudad, la identificación del suelo de conservación por alcaldía, el uso de suelo y vegetación, el número de habitantes, las elevaciones, el clima, así como el promedio de las temperaturas máximas, medias y mínimas registradas en la CDMX en los últimos cinco años.
2. **Descarga de imágenes satelitales.** Desde la plataforma USGS se descargaron imágenes desde el 2013 hasta el 2024 para hacer comparaciones de la evolución de la zona urbana, de la LST y de la vegetación a lo largo del tiempo. Se descargaron imágenes satelitales de las misiones Landsat que abarcaran por completo la zona de estudio y que tuvieran una nubosidad entre 0 – 1%, procurando estar lo más cercano al 0% para que las nubes no impidieran la visión de las imágenes y evitar variaciones en los resultados tras su procesamiento. Adicionalmente, las imágenes satelitales descargadas fueron de la misma época del año para que la comparación de estas fuera adecuada y tener mayor certidumbre en los resultados, es decir, todas corresponden una época del año en que la vegetación tiene ciertas características en relación con la temperatura y la lluvia presentada, a excepción de la imagen descargada para el año 2013.
3. **Procesamiento de imágenes satelitales.** Una vez descargadas las imágenes, se utilizó QGIS como software para el procesamiento de las imágenes. Se hicieron combinaciones de bandas para obtener una imagen de color verdadero (RGB) y una de falso color para detectar zonas urbanas, de igual forma se aplicaron expresiones algebraicas para obtener el NDVI y se hizo uso de un complemento en QGIS para obtener la LST.
4. **Identificación de islas de calor urbanas (ICU).** Una vez procesadas las imágenes, se eligieron algunos puntos de interés, esto identificando las zonas con mayor

concentración de calor para demostrar el fenómeno de *ICU* en la CDMX y, a su vez, se seleccionaron zonas vegetadas para demostrar el efecto contrario, es decir, comprobar los efectos de enfriamiento que tienen la vegetación y los materiales antirreflejantes en las zonas urbanas (zonas "frías"). Para los puntos en donde se identificaron *ICU* se consideró el píxel con la LST máxima y el NDVI mínimo registrados en el área del punto de interés y, para los puntos identificados como zonas "frías", se tomó en cuenta el píxel con la LST mínima y el NDVI máximo en esa área.

5. **Análisis de resultados.** Habiendo identificado las *ICU* y las zonas "frías" y al comparar la relación de estos fenómenos con la LST y la vegetación presente, se comprobó la importancia de la vegetación en la zona urbana para mitigar las *ICU* en los distintos puntos de interés seleccionados.

6. **Determinación de estrategias, técnicas, medidas o acciones adecuadas para la mitigación de ICU.** Al comprobar la existencia de las *ICU* en la CDMX e identificar la importancia de la vegetación en las zonas urbanas, se presenta una recopilación de estrategias, técnicas, medidas o acciones adecuadas para la mitigación de *ICU* en urbes, pero sin aplicarlas directamente a las zonas de estudio ya que queda fuera de los alcances de este trabajo de investigación.

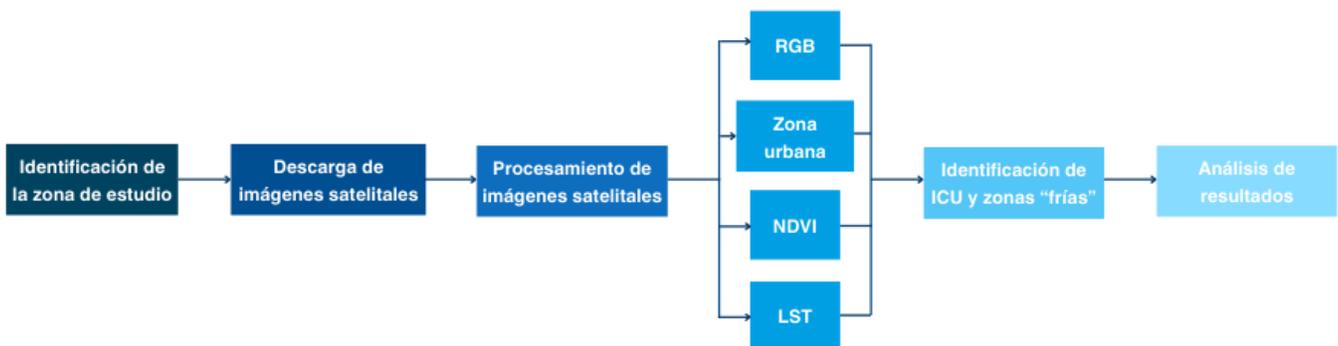


Figura 11. Esquema metodológico del trabajo de investigación. Elaboración propia.

Plataformas y fuentes de información

USGS: Earth Explorer

El *United States Geological Survey (USGS)*, fundado inicialmente como Geological Survey el 3 de marzo de 1879, es la agencia estadounidense encargada de estudiar el paisaje, los recursos y los peligros naturales que amenazan al país. Específicamente, sus áreas de estudio incluyen a las disciplinas de biología, geografía, geología e hidrología.

El portal de datos *USGS: Earth Explorer* permite obtener conjuntos de datos geoespaciales provenientes de sus colecciones. Facilitan la descarga de imágenes satelitales de Landsat, datos de Radar, datos de UAS, gráficos de líneas digitales, datos de modelos digitales de elevación, fotografías aéreas, datos satelitales de Landsat, algunas imágenes de satélites comerciales, incluidos IKONOS y OrbView3, datos de cobertura terrestre, datos de mapas digitales del Mapa Nacional y muchos otros conjuntos de datos. Es posible hacer búsquedas de una ubicación específica al utilizar el mapa interactivo o al introducir las coordenadas del sitio de estudio para visualizar y descargar los datos disponibles. La descarga de los datos es gratuita, solo es necesario registrarse como usuario en la plataforma.

QGIS

QGIS es una aplicación de SIG con un software de acceso libre y de Código Abierto licenciado bajo GNU – General Public License. Es compatible con varios sistemas operativos como son: Microsoft Windows, macOS, Linux, Android, POSIX y Berkeley Software Distribution. En el año 2002 Gary Sherman empezó el desarrollo de Quantum GIS, el cual, en 2007, se volvió el proyecto base de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). La versión 1.0 del programa se lanzó en 2009 y, en el 2013, junto con el lanzamiento de la versión 2.0 el programa cambió de nombre oficialmente de Quantum GIS a QGIS.

QGIS permite al usuario crear, editar, visualizar, analizar y publicar información geoespacial. El programa ofrece recursos online y mapas disponibles para descarga. Para análisis geográficos más complejos, el software permite utilizar complementos (plugins) y algoritmos. Los plugins son aplicaciones extra que se pueden descargar dentro del programa para completar una tarea específica que no es tan fácil de completar sin hacer uso de algún complemento.

Específicamente, en este trabajo de investigación se hizo uso de la versión 3.28 Firenze LTR (Long Term Release) y del Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el cual es un complemento que permite la clasificación supervisada de imágenes obtenidas con percepción remota, proporcionando herramientas para la descarga, el preprocesamiento y el postprocesamiento de imágenes. De igual forma, el plugin ofrece varios algoritmos para la clasificación de la cubierta terrestre.

Para el presente trabajo de investigación se descargaron datos de las misiones Landsat 8 y 9. Este criterio se decidió considerando que, como se realizarían análisis de LST, era necesario contar con imágenes con bandas térmicas. Los datos descargados después se procesaron en QGIS, siempre tomando en cuenta que los satélites pasan por la zona de estudio entre las 16:58 y las 17:00 UTC, es decir, entre las 10:58 y 11:00 en el horario de la Ciudad de México (UTC-6). También, es importante mencionar que las imágenes que se muestran en el *capítulo 5* fueron recortadas con la forma de la Ciudad de México para delimitar la zona de estudio, ya que de no hacerlo la imagen satelital completa muestra otras áreas de interés no relevantes para este trabajo de investigación.

Capítulo 5. Resultados y análisis de resultados

Zona de estudio

La Ciudad de México se localiza en el centro sur del país y tiene una extensión total de 1,494.3 km², lo cual representa al 0.1% de la superficie total del país.

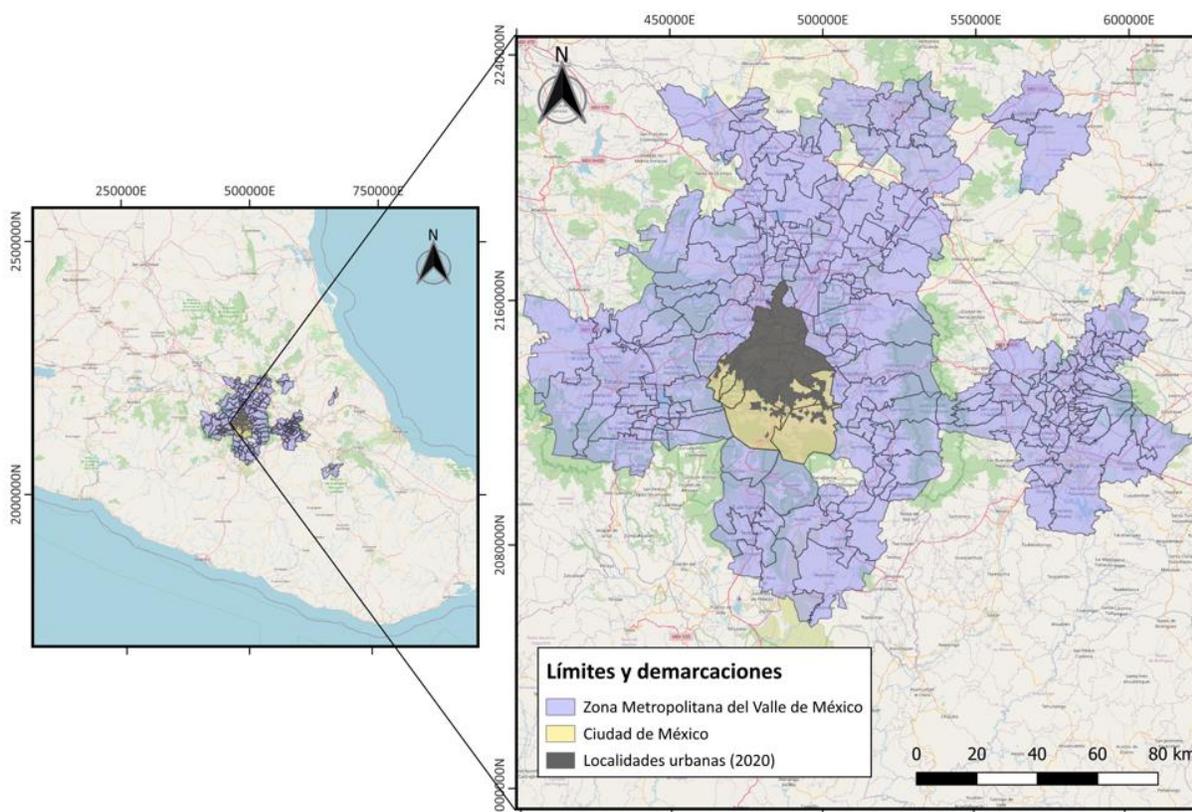


Figura 12. Localización y delimitación geográfica de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2020.

Limita al norte, al este y al oeste con el Estado de México y al sur con el estado de Morelos. Las 16 alcaldías de la Ciudad de México, junto con 69 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca del estado de Hidalgo conforman la ZMVM, la cual en muchas ocasiones es estudiada en conjunto debido a la importante interacción que existe entre ellos, tanto en aspectos económicos, como en aspectos sociales y de calidad del aire.

La zona urbana de la CDMX representa gran parte del territorio, o al menos es la percepción que se tiene comúnmente, pero es importante resaltar que hacia el sur de la Ciudad se pueden encontrar zonas agrícolas, bosques de diferentes tipos, pedregales, humedales y algunos pastizales de alta montaña, es decir, grandes zonas de suelo de conservación las cuales representan cerca del 59% del territorio, como se muestra en *figura 13*. En la *tabla 4* se pueden

observar los porcentajes de territorio y su equivalencia en hectáreas de las alcaldías que cuentan con suelo de conservación.

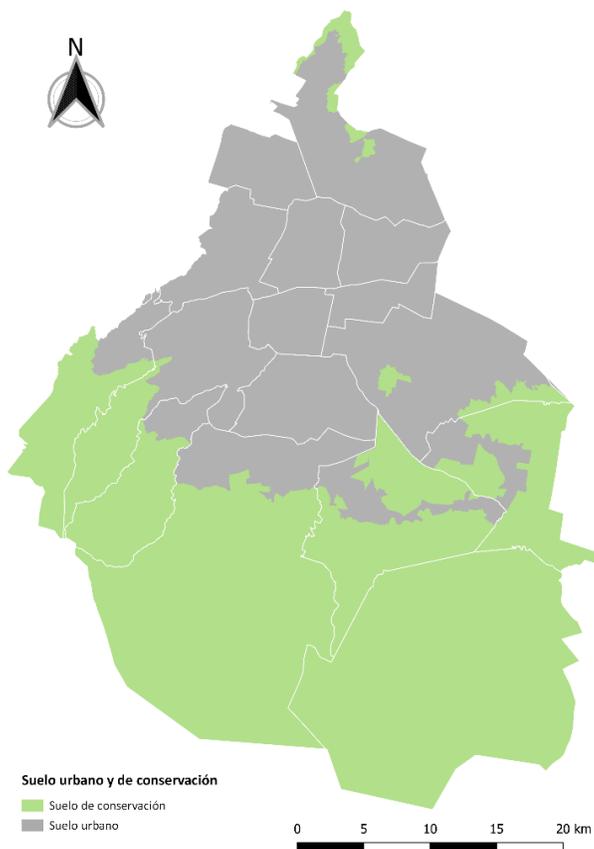


Figura 13. Suelo urbano y de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de INEGI, 2010a.

Tabla 4. Suelo de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de SEDEMA, 2015.

Alcaldía	Suelo de Conservación	
	%	Área (Ha)
Milpa Alta	32.2	28,108
Tlalpan	29.4	25,664
Xochimilco	11.9	10,388
Cuajimalpa de Morelos	7.5	6,547
Tláhuac	7.2	6,285
Magdalena Contreras	5.9	5,150
Álvaro Obregón	3.1	2,706
Gustavo A. Madero	1.4	1,222
Iztapalapa	1.4	1,222
Total	100	87,294

De manera más detallada, en la *figura 14* se muestra el uso de suelo y vegetación presente en la Ciudad de México. Posteriormente, la *tabla 5* contiene los valores de la superficie en hectáreas de cada uno de los usos de suelo presentes en la Ciudad.

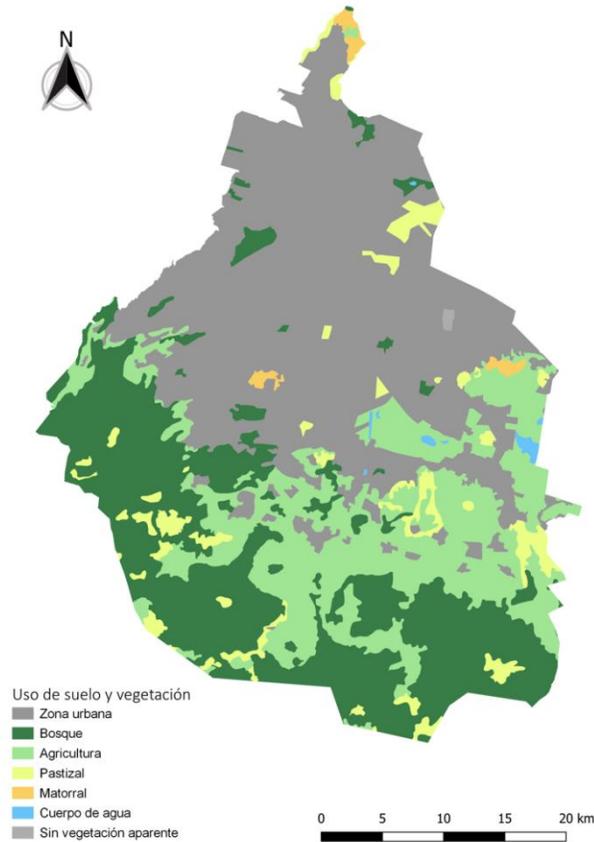


Figura 14. Uso de suelo y vegetación de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, serie VII, 2021.

Tabla 5. Superficie del uso de suelo y vegetación de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, serie VII, 2021.

Uso de suelo y vegetación	Área (Ha)
Zona urbana	65,362
Bosque	42,690
Agricultura	139
Pastizal	6,975
Matorral	978
Cuerpo de agua	458
Sin vegetación aparente	139
Total	149,473

La mancha urbana ha ido avanzando rápidamente debido a varios factores, principalmente por la inmigración de habitantes de otros estados hacia la Ciudad, lo cual ha puesto en peligro a los ecosistemas presentes en el territorio, como lo son lagos y distintas zonas con uso de suelo de conservación.

Adicional a lo ya presentado, la Ciudad de México cuenta con un total de 46,360.38 Ha de áreas verdes distribuidas en viveros, plazas, parques, arboledas, alamedas, jardines públicos, áreas protegidas y equipamientos urbanos con vegetación, como lo son deportivos e instituciones académicas públicas, como se muestra en la *figura 15*, cabe mencionar que no se están considerando los panteones como áreas verdes en esta clasificación. En la *tabla 6* se muestra el área en hectáreas por cada concepto clasificado.

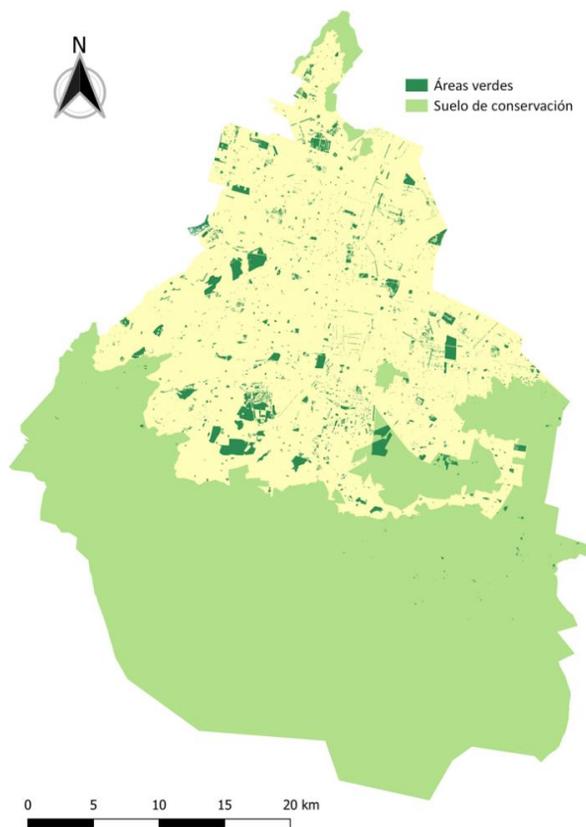


Figura 15. Áreas verdes y suelo de conservación en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2010 y SEDEMA, 2017.

Tabla 6. Áreas verdes en Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2010 y SEDEMA, 2017.

Categoría	Área (Ha)
Viveros	420
Áreas protegidas	7,183
Parques, arboledas y alamedas	12,673
Plazas y jardines	1,364
Equipamientos urbanos con vegetación	18,792
Sin clasificación	5,925
Total	46,360

De acuerdo con el último censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año 2020, la Ciudad de México estaba en el lugar número 2 en población a nivel nacional con un total de 9,209,944 personas, de las cuales el 52.2% son mujeres y el 47.8% son hombres. En la *tabla 7* se muestra la distribución de habitantes en cada una de las 16 alcaldías de la Ciudad.

Tabla 7. Habitantes por alcaldía en la Ciudad de México, 2020. Fuente: INEGI, Censo de población y vivienda, 2020.

Demarcación territorial	Habitantes 2020
Azcapotzalco	432,205
Coyoacán	614,447
Cuajimalpa de Morelos	217,686
Gustavo A. Madero	1,173,351
Iztacalco	404,695
Iztapalapa	1,835,486
La Magdalena Contreras	247,622
Milpa Alta	152,685
Álvaro Obregón	759,137
Tláhuac	392,313
Tlalpan	699,928
Xochimilco	442,178
Benito Juárez	434,153
Cuauhtémoc	545,884
Miguel Hidalgo	414,470
Venustiano Carranza	443,704
Total	9'209,944

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), la Ciudad de México se encuentra asentada en la Cuenca de México, una unidad hidrológica cerrada ubicada sobre una llanura lacustre y que también forma parte del Eje Neovolcánico Transversal.

De forma específica, la Ciudad limita al norte con la sierra de Guadalupe, un conjunto de montañas que envuelve a la comunidad de Cuauhtepc de Madero y baja hasta las inmediaciones de la Villa de Guadalupe, donde termina en el cerro del Tepeyac. Hacia el centro oriente se encuentra la sierra de Santa Catarina, una cadena volcánica cuyo punto más alto es el volcán de Guadalupe a 2,820 metros sobre el nivel del mar. En el poniente, cerca del centro de la Ciudad, se encuentra el cerro de Chapultepec, el cual delimita el inicio de las sierras que recorren desde el oeste hasta el sureste de la Ciudad y separan al Valle de México de los Valles de Toluca y Morelos. Hacia el oriente se encuentra el volcán Ajusco, que es la cumbre más elevada de la Ciudad y da nombre al conjunto de cerros que cierran la cuenca de México por el sur. Esta cadena montañosa es parte del Eje Neovolcánico y también se le llama sierra de Chichinauhtzin. El resto y la mayor parte de la Ciudad se asienta principalmente sobre planicie poco accidentada en donde solo se pueden encontrar algunos pequeños cerros y lomas. En la *figura 16* se pueden apreciar las elevaciones de la Ciudad y las sierras y cadenas montañosas que se describieron anteriormente.

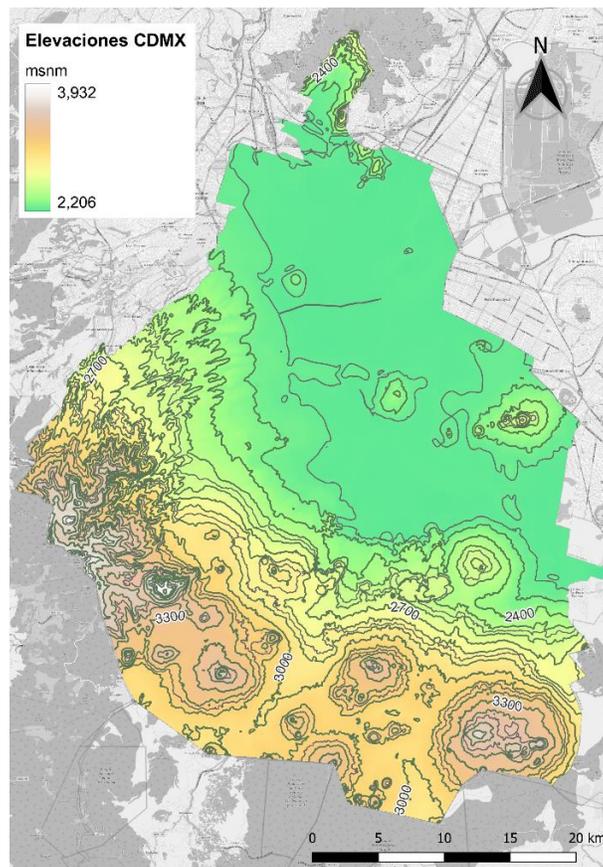


Figura 16. Elevaciones de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos del INEGI, 2013.

En la *figura 17* se muestran las alturas máximas y mínimas de la Ciudad que, como se mencionó anteriormente, es el cerro del Ajusco el punto más alto de la Ciudad con 3,930 metros sobre el nivel del mar.

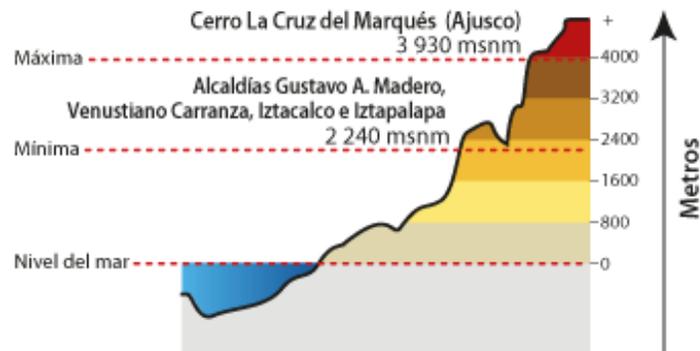


Figura 17. Altitudes máximas y mínimas en la Ciudad de México. INEGI, 2013.

La mayor parte del territorio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en el verano, mientras que en el resto se presentan climas semifrío húmedo y semifrío subhúmedo al sur y suroeste, y seco semiseco al noreste, como se muestra en la *figura 18*.

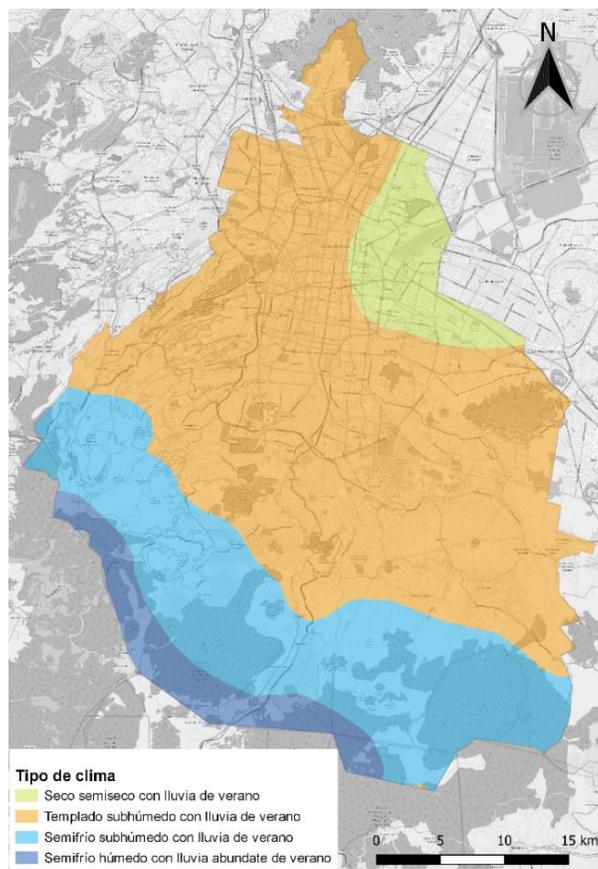


Figura 18. Climas de la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de INEGI, 2021.

A continuación, en la *tabla 8* se muestran los datos de las temperaturas máximas, medias y mínimas desde el año 2019 al 2023. En dicha tabla se puede observar que la temperatura máxima promedio es de 25.14°C y cabe mencionar que los meses del año con más altas temperaturas son del mes de marzo al mes de julio, pero abril y mayo son los meses más calientes en todo el año. En cuanto a la temperatura mínima se tiene un promedio de 11.54°C y los meses con temperaturas más bajas son de noviembre a febrero.

Tabla 8. Temperaturas máxima, media y mínima en la Ciudad de México. Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2024.

Año	Temperatura máxima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima (°C)
2019	25.4	18.8	12.1
2020	25.4	18.3	11.1
2021	25.1	17.9	10.8
2022	24.7	18.3	11.9
2023	25.1	18.5	11.8
Promedio	25.14	18.36	11.54

A la mezcla equilibrada de gases y sustancias presentes en la atmósfera se le conoce como aire y es el medio continuo por el cual los contaminantes se dispersan y transportan. Cuando los contaminantes ya se encuentran contenidos en la atmósfera, su persistencia depende de diferentes factores como el lavado por lluvia, la deposición por gravedad e impacto contra superficies o por las reacciones químicas que se presentan en la atmósfera y transforman a los contaminantes principales en contaminantes secundarios.

Para preservar una buena calidad del aire es importante que las concentraciones de los contaminantes sean diluidas, esto sucede principalmente mediante las condiciones meteorológicas. Es decir, si se tiene una atmósfera inestable con vientos de alta intensidad, se favorece la dispersión y transporte de contaminantes debido a las turbulencias atmosféricas ocasionadas por los vientos, por lo que el aire estará menos contaminado. De forma contraria, si los vientos son débiles, se tiene baja nubosidad y alta radiación solar, se propicia la acumulación de contaminantes y la formación de contaminantes secundarios.

El aire que se respira diariamente en la Ciudad es el resultado de la mezcla de sustancias químicas liberadas por las actividades humanas como el transporte, los productos de uso personal y residencial, así como también, por las actividades industriales o comerciales. Las emisiones producidas por estas actividades inciden directamente en el deterioro del agua, del suelo y la vegetación, dañan la infraestructura de los edificios, afectan el clima y la visibilidad del entorno. De igual forma, al estar expuestos de manera aguda o crónica al aire urbano, la salud de los habitantes se ve afectada provocando, principalmente, enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

A continuación, se presenta la tabla 9 donde se mencionan las características de cada imagen satelital procesada.

Tabla 9. Características de las imágenes satelitales procesadas. Elaboración propia con datos de USGS, 2024.

Año	Fecha	Satélite y sensor	Nubosidad	Estación del año
2013	18 de abril	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.33%	Primavera
2016	21 de enero	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.1%	Invierno
2019	29 de enero	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.03%	Invierno
2020	17 de febrero	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.04%	Invierno
2021	3 de febrero	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.04%	Invierno
2022	22 de febrero	Landsat 8 – OLI – TIRS	0.03%	Invierno
2023	16 de enero	Landsat 9 – OLI – TIRS	0.04%	Invierno
2024	4 de febrero	Landsat 9 – OLI – TIRS	0.05%	Invierno

A pesar de que todas las imágenes mencionadas en la *tabla 9* fueron procesadas de la misma manera para obtener los mismos resultados en todos los casos, es decir, para obtener las imágenes de color verdadero (RGB), falso color, NDVI y LST, en los siguientes apartados solo se mostrarán los resultados para los años 2022 y 2024, ya que en el año 2022 es en el que se observa el registro de LST más alto de todas las imágenes estudiadas en la temporada de invierno y 2024 es el año actual. Las imágenes procesadas para los otros años (2013, 2016, 2019, 2020, 2021 y 2023) junto con sus respectivos resultados se adjuntan en el apartado de *Anexos* al final del trabajo de investigación.

Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color

En este apartado se muestran las figuras 19 y 20 correspondientes a las imágenes de color verdadero (RGB) y falso color (detección de zona urbana) para los años 2022 y 2024.

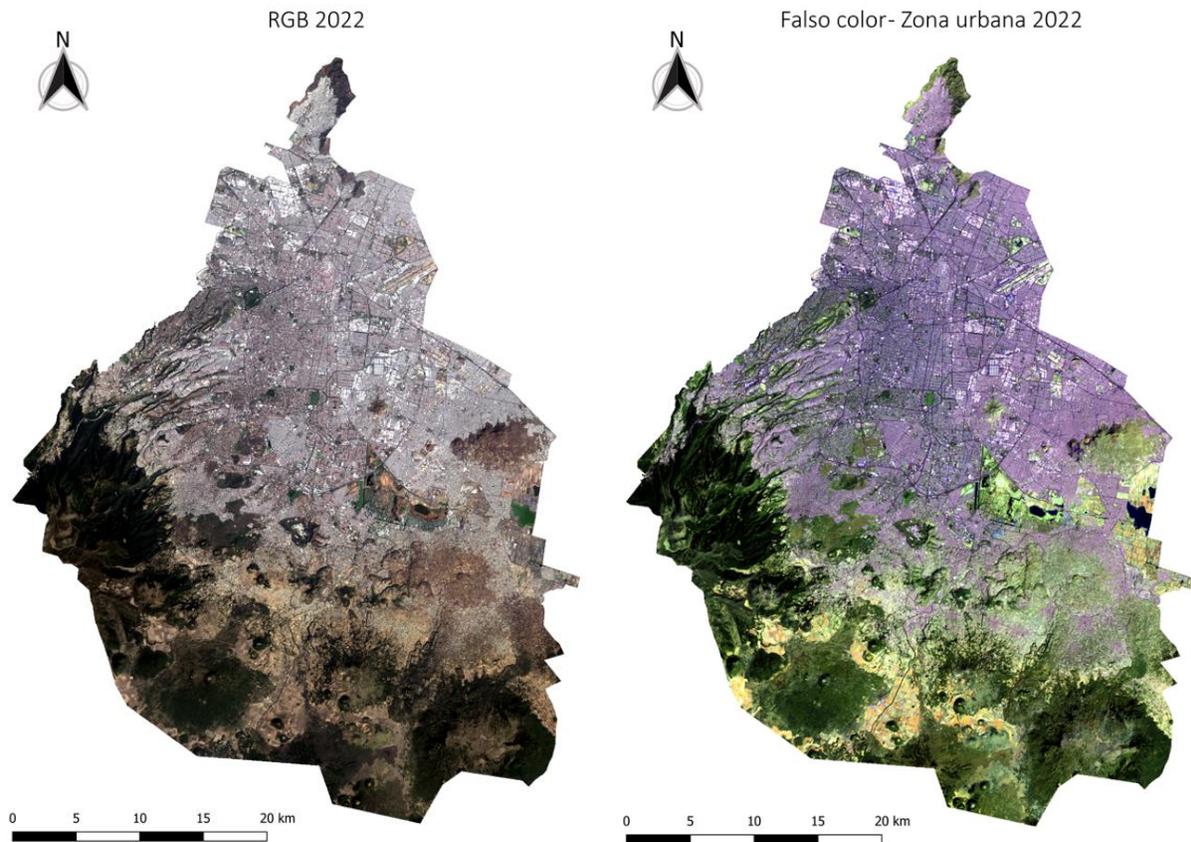


Figura 19. Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color para el año 2022. Elaboración propia con datos de Landsat 8.

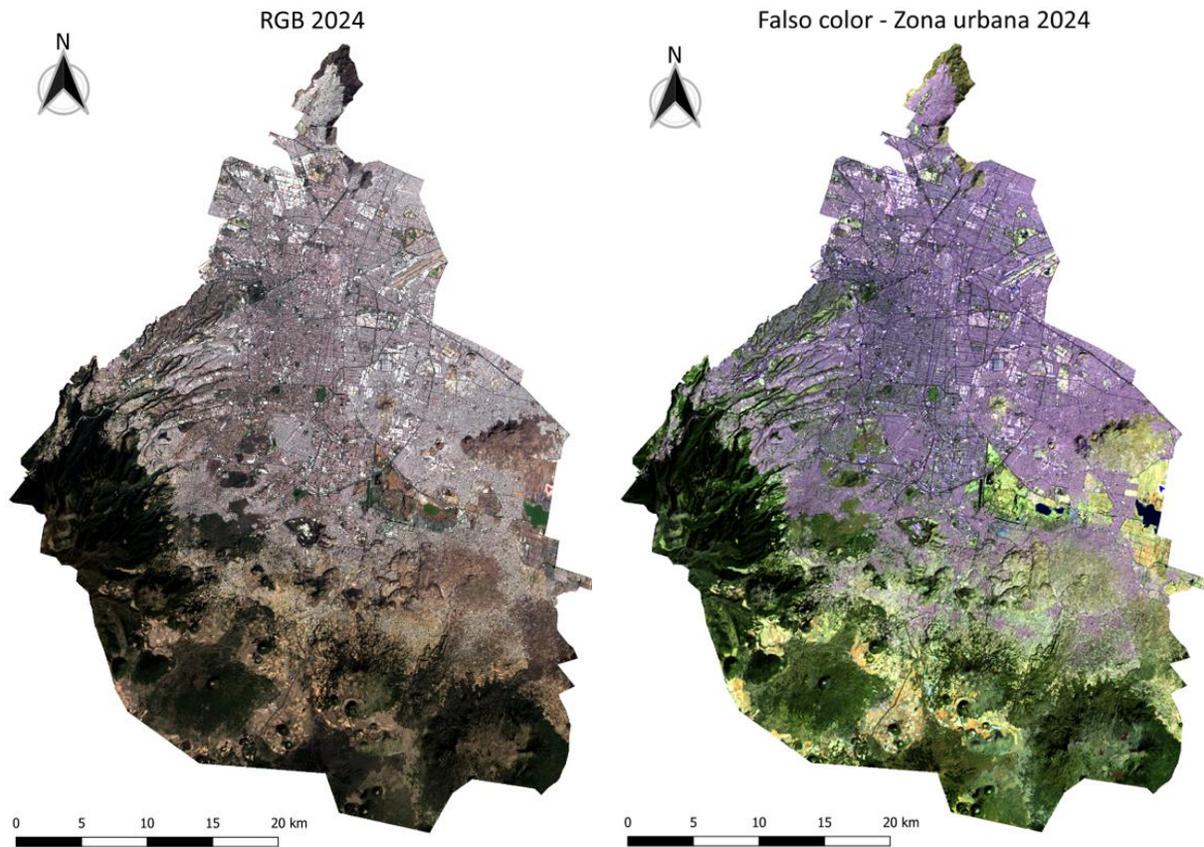


Figura 20. Imágenes de color verdadero (RGB) y falso color para el año 2024. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Como se puede observar, la delimitación de la zona urbana en las imágenes RGB es notoria aún sin aplicar la combinación de bandas para obtener la imagen de falso color, pero la tonalidad morada permite observar mejor los límites de la zona urbana en la Ciudad. Al observar las imágenes de falso color prestando especial atención en las zonas donde existe suelo de conservación, específicamente al sur de la Ciudad, se puede apreciar cómo se están urbanizando poco a poco estas áreas llevando a la CDMX a seguir perdiendo zonas vegetadas o de conservación y permitiendo que se siga expandiendo el fenómeno de ICU a más zonas.

NDVI y LST

En las figuras 21 y 22 se muestran las imágenes procesadas con los resultados de NDVI y LST para los años de 2022 y 2024 para toda el área de la CDMX.

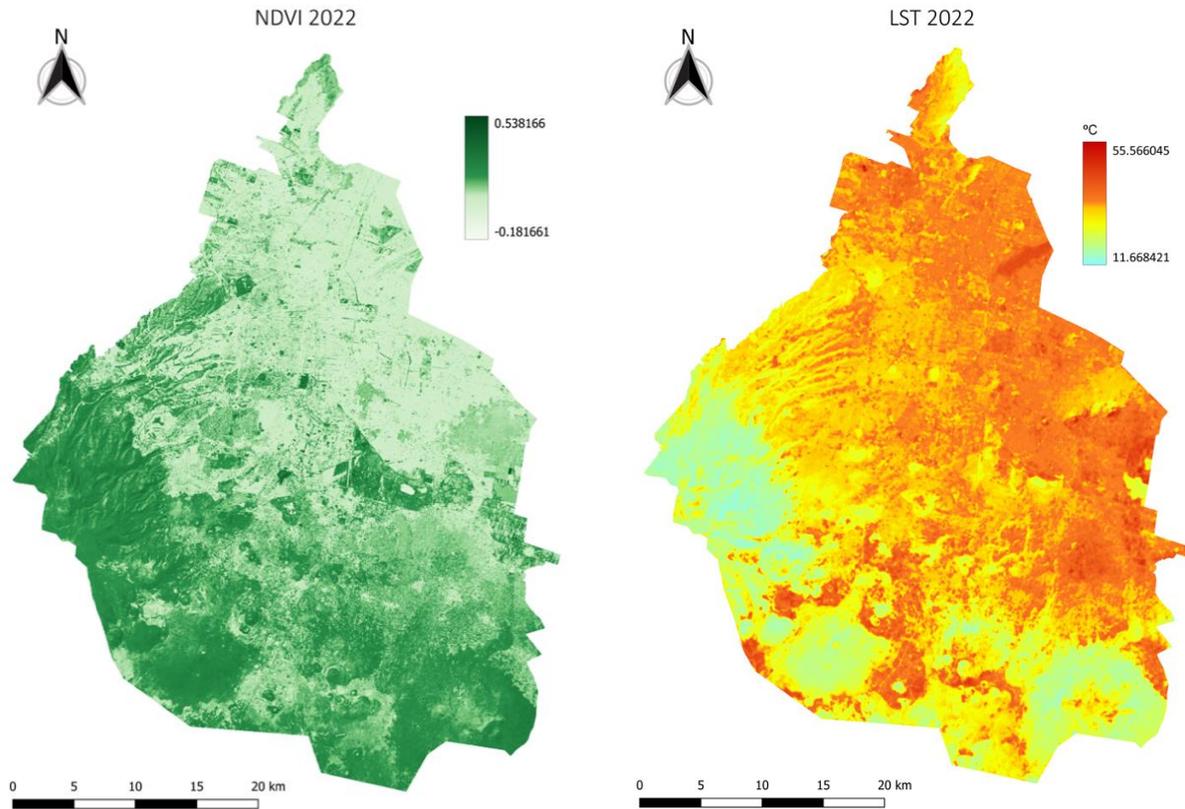


Figura 21. NDVI y LST para el año 2022. Elaboración propia con datos de Landsat 8.

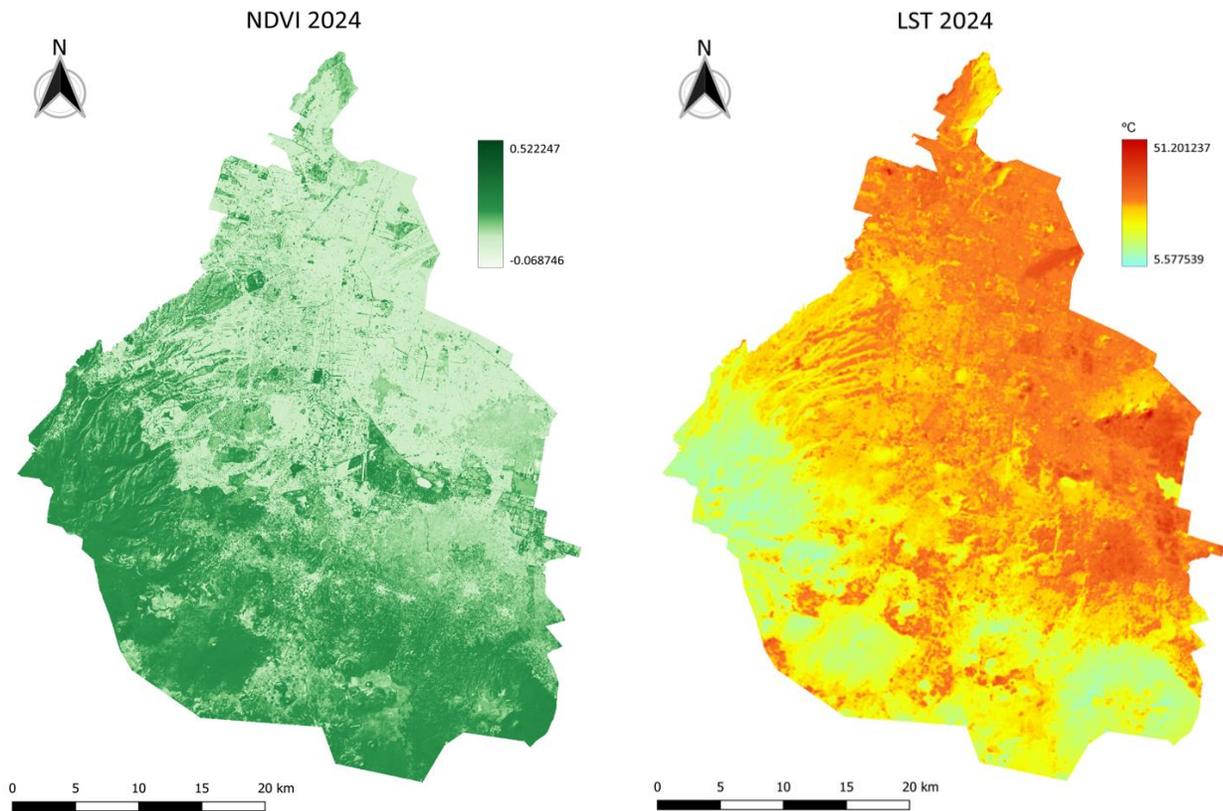


Figura 22. NDVI y LST para el año 2024. Elaboración propia con datos de Landsat 9.

Tabla 10. Resumen de los valores máximos y mínimos registrados de NDVI y LST en CDMX de 2013 a 2024.

Año	NDVI máx.	NDVI mín.	LST máx. (°C)	LST mín. (°C)
2013	0.5181	-0.1606	61.97	-1.64
2016	0.5339	-0.1717	44.92	0.87
2019	0.5574	-0.1534	45.00	3.13
2020	0.5125	-0.0932	53.38	8.28
2021	0.5274	-0.0606	50.51	7.22
2022	0.5382	-0.1817	55.57	11.67
2023	0.5297	-0.0470	47.74	5.15
2024	0.5222	-0.0687	51.20	5.57
Promedio	0.5299	-0.1171	51.29	5.03

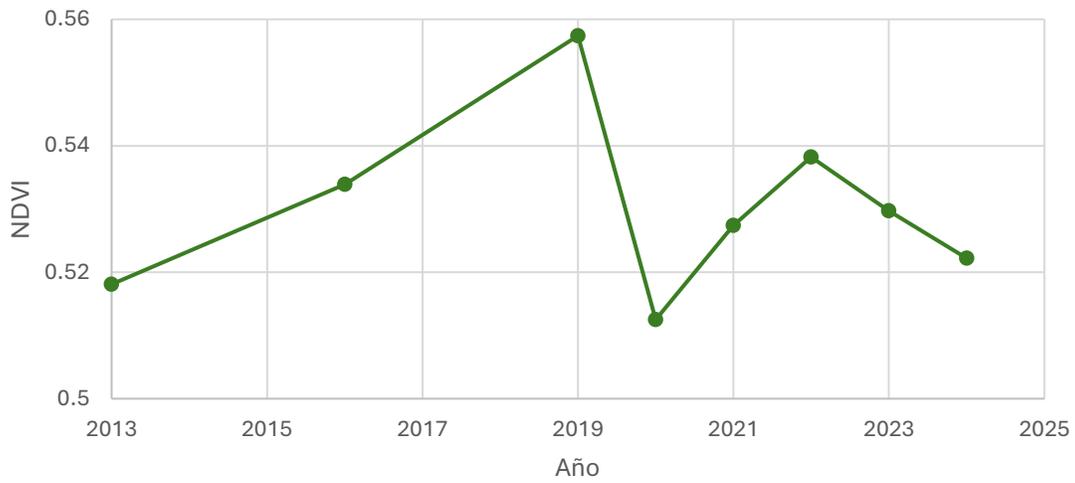


Figura 23. Valores de NDVI máximos de 2013 a 2024. Elaboración propia.

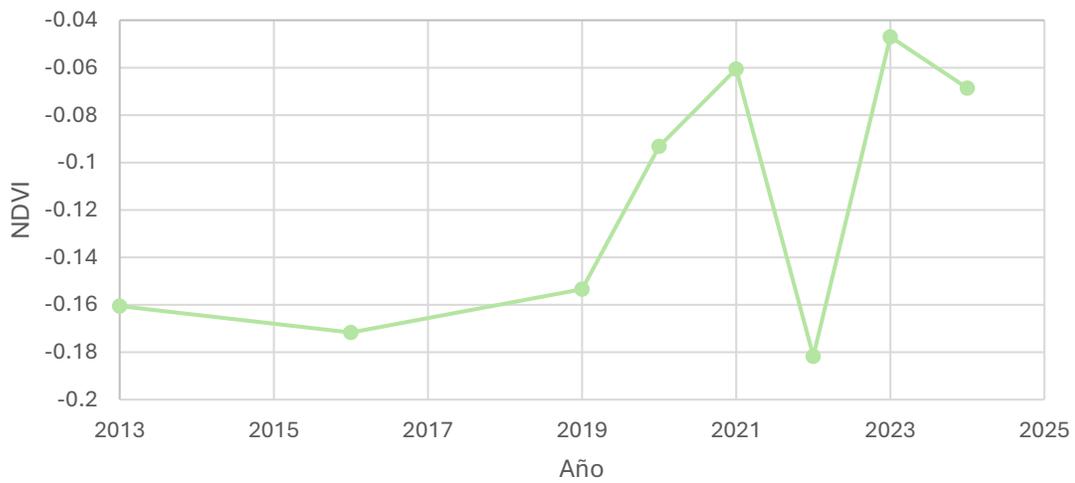


Figura 24. Valores de NDVI mínimos de 2013 a 2024. Elaboración propia.

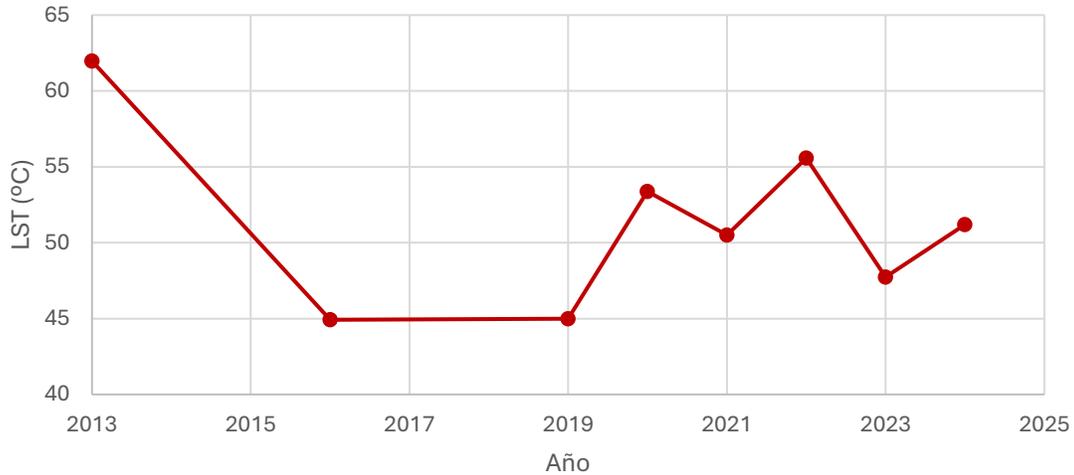


Figura 25. Valores de LST máximos de 2013 a 2024. Elaboración propia.

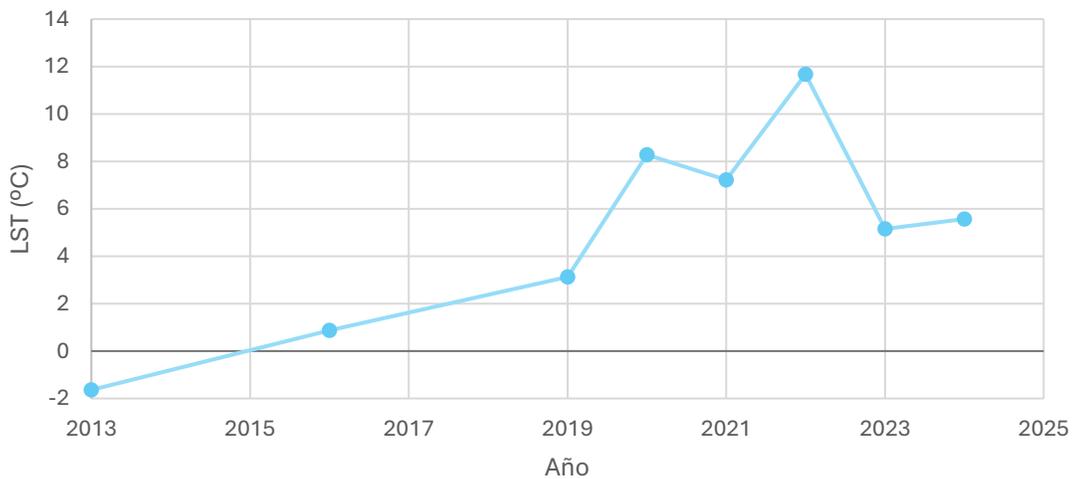


Figura 26. Valores de LST mínimos de 2013 a 2024. Elaboración propia.

A partir de las imágenes procesadas para NDVI y LST en todos los años analizados (*figuras 21, 22, 62 y 63*), se obtuvieron los datos resumidos en la *tabla 10* y representados gráficamente en las *figuras 23, 24, 25 y 26*. En estas gráficas se observa que la vegetación en la CDMX ha permanecido relativamente constante, con valores máximos de NDVI que varían entre 0.5125 en 2020 y 0.5574 en 2019. Sin embargo, los valores de LST muestran mayor variabilidad y un aumento notable en los valores mínimos registrados a lo largo del tiempo: en 2013, el valor mínimo fue de -1.64°C , mientras que en los años siguientes todos los valores se mantuvieron por encima de 0°C , destacando especialmente el valor de 11.67°C registrado en 2022

Identificación de islas de calor urbanas y zonas “frías”

En la *tabla 11* se enlistan los puntos de interés donde se identificaron los fenómenos de *ICU* y zonas “frías” en la CDMX. Como se mencionó anteriormente, para las *ICU* se consideró el píxel con la *LST* más alta y el *NDVI* más bajo y para las zonas “frías” se consideró el píxel con la *LST* más baja y el *NDVI* más alto, dichos valores se muestran para los años de 2022 y 2024 en las columnas de *NDVI* y *LST*, respectivamente.

Posteriormente, se realiza el análisis de cada punto de interés con las características y datos relevantes observados en cada uno de estos.

Tabla 11. Identificación de *ICU* o zonas “frías” en las alcaldías de la CDMX. Elaboración propia.

Punto de interés	Alcaldía	NDVI		LST (°C)		Fenómeno presentado
		2022	2024	2022	2024	
Almacenes y naves industriales	Azcapotzalco	-0.0348	-0.0616	55.56	50.35	ICU
AICM	Venustiano Carranza	-0.0269	-0.0331	44.15	38.49	ICU
Expo Santa Fe	Álvaro Obregón	-0.0434	-0.0350	41.76	39.58	ICU
Paradero Taxqueña y Central de Autobuses del Sur	Coyoacán	-0.0326	-0.0345	41.33	36.30	ICU
Club Campestre	Coyoacán	0.4821	0.5149	20.95	20.89	Zona “fría”
Estacionamiento Six Flags	Tlalpan	0.0344	0.0206	39.35	33.53	ICU
Fórum Buenavista	Cuauhtémoc	-0.0029	-0.0083	39.09	36.31	ICU
Biblioteca Vasconcelos	Cuauhtémoc	0.2982	0.2779	32.05	27.74	Zona “fría”
WTC México	Benito Juárez	-0.0116	-0.0244	37.37	34.54	ICU
REPSA	Coyoacán	0.4171	0.4329	26.75	22.65	Zona “fría”
Chapultepec Sección I	Miguel Hidalgo	0.4323	0.4202	23.17	20.14	Zona “fría”

Almacenes y naves industriales Azcapotzalco

En la alcaldía Azcapotzalco es común encontrar zonas industriales, pero este punto en específico alberga almacenes y naves industriales de diferentes distribuidores que, por sus actividades, tipo de materiales utilizados para su construcción y su poca o nula vegetación generan la *ICU* más intensa registrada en la CDMX (*figura 27*).

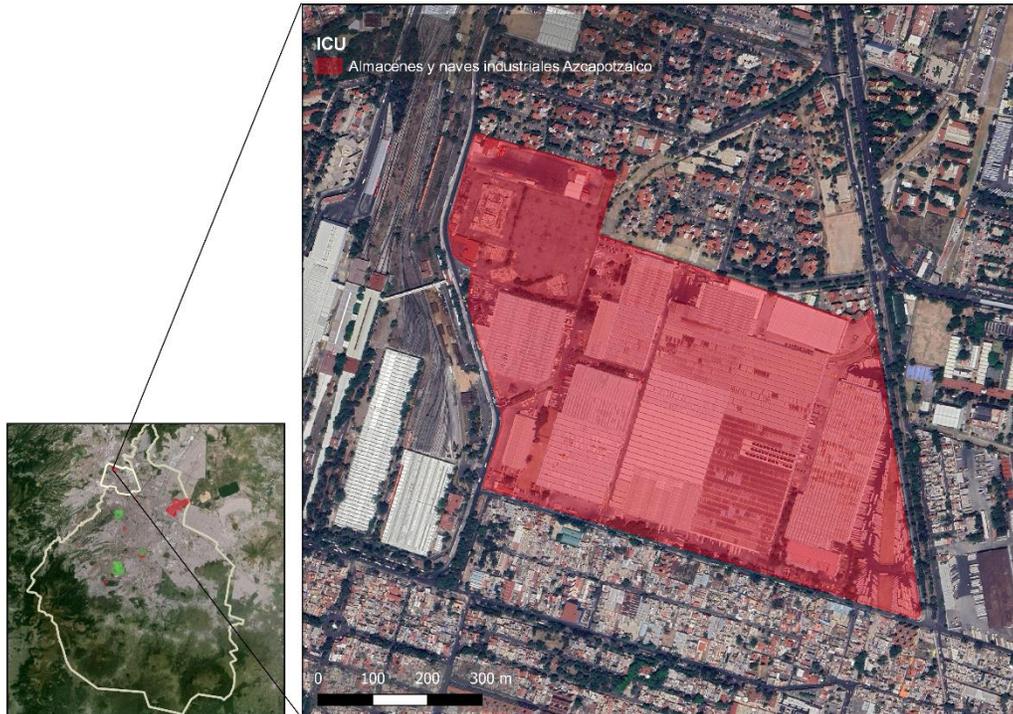


Figura 27. ICU de los almacenes y naves industriales en Azcapotzalco. Elaboración propia.

Al analizar las imágenes procesadas de LST y NDVI de la CDMX fue sencillo identificar que este punto de interés es el que tiene la mayor LST en la Ciudad al presentar valores máximos de 55.54°C en 2022 y 50.33°C en 2024. Los valores mínimos de NDVI registrados fueron de -0.0472 para el 2022 y de -0.0616 para el 2024, lo que comprueba la relación de la nula vegetación con altos valores de LST (*figura 28*).

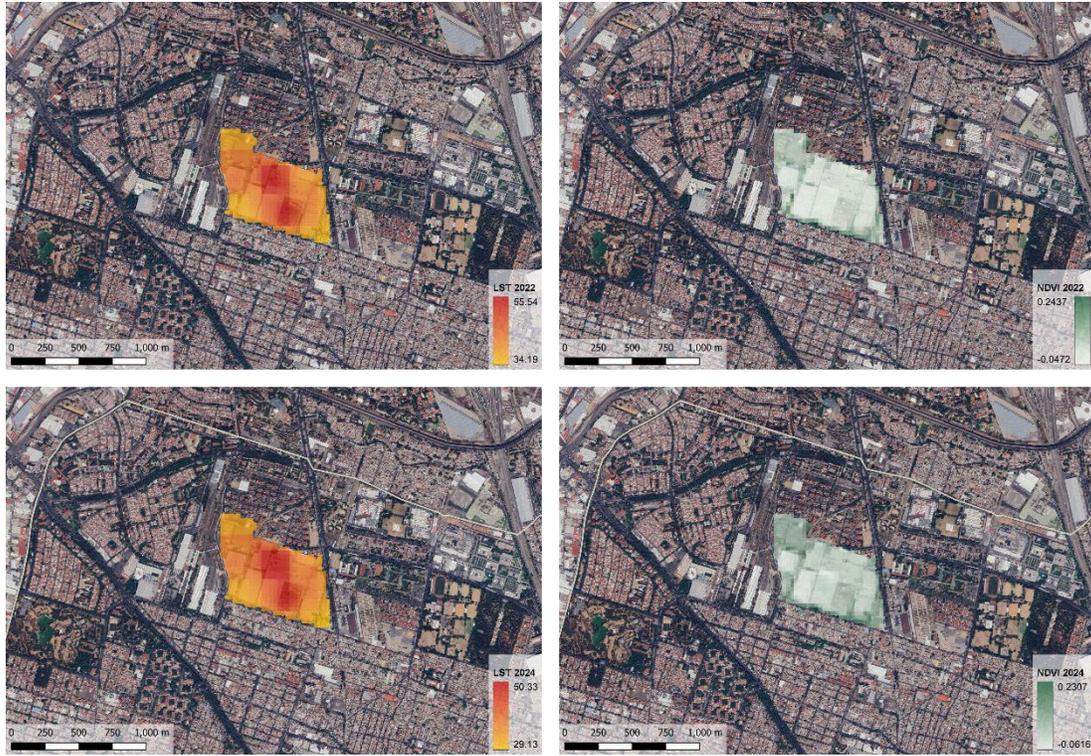


Figura 28. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de los almacenes y naves industriales en Azcapotzalco (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)

El AICM se encuentra en la alcaldía Venustiano Carranza y se eligió como punto de interés debido a que es un área muy grande con muy poca o nula vegetación en sus alrededores y en su interior (*figura 29*). El aeropuerto se inauguró en el año de 1931, época en la que la zona urbana de la Ciudad de México no se extendía hasta los límites del AICM, pero conforme fue aumentando la población, la zona urbana ha alcanzado los límites del aeropuerto por lo que las afectaciones que este genera ahora ya influyen significativamente a la población aledaña a la zona.

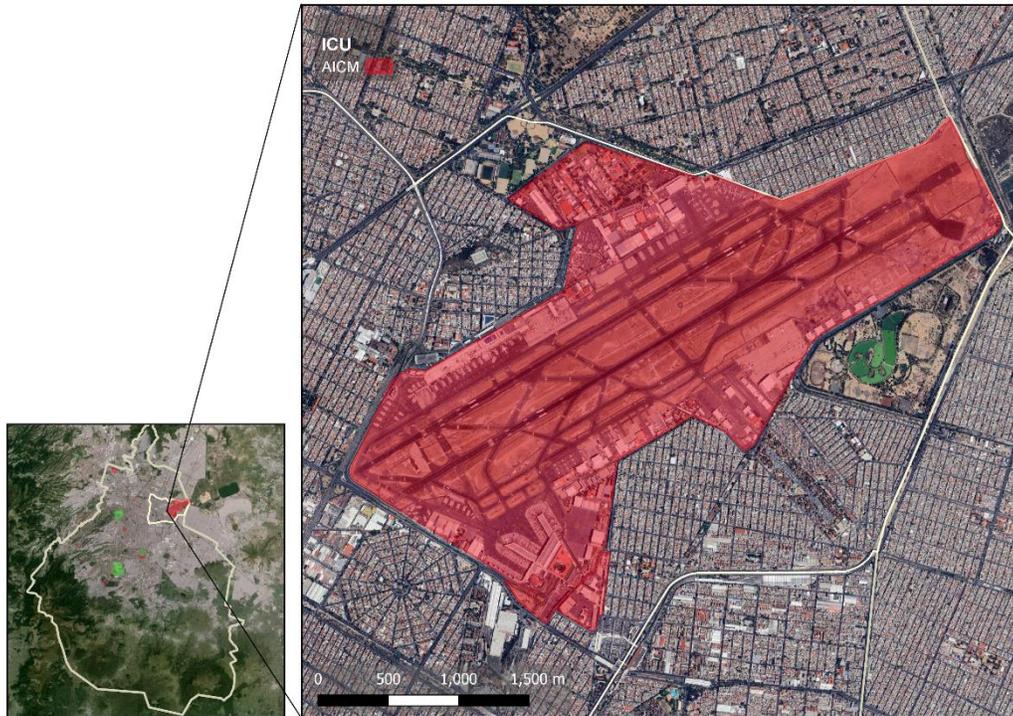


Figura 29. ICU del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. *Elaboración propia.*

La ICU generada por este sitio es de las más grandes en la Ciudad debido a que el aeropuerto cuenta con dos pistas de despegue, dos terminales y un total de 740 Ha destinadas a los diferentes espacios que componen al aeropuerto, es decir, tiene poca disponibilidad para albergar áreas verdes y las emisiones generadas por los aviones, vehículos, instalaciones y por los usuarios son tan grandes que provocan modificaciones de la temperatura en el sitio. Los valores máximos de LST en este sitio fueron de 44.86°C para el 2022 y de 39.91°C para el 2024, mientras que para el NDVI se registraron valores mínimos de -0.0332 para el 2022 y de -0.0382 para el 2024, como se muestra en la *figura 30*.

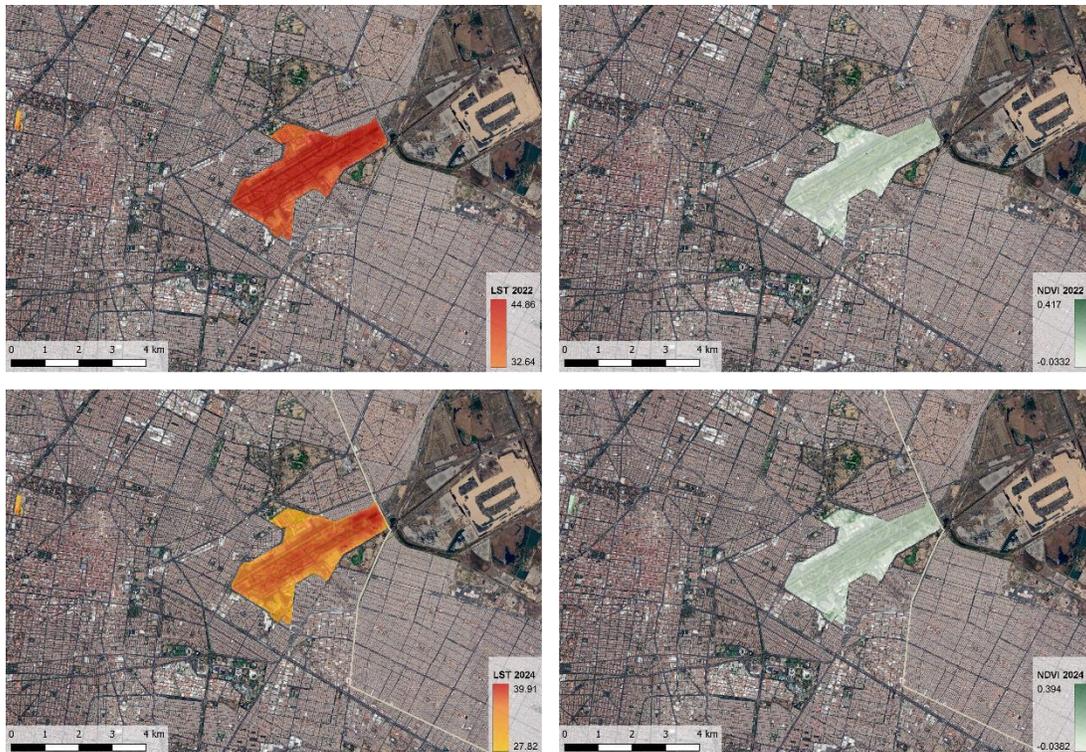


Figura 30. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del AICM (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Es común que los aeropuertos no cuenten con infraestructura verde ni con mecanismos para mitigar los impactos ambientales negativos derivados de su operación, debido a que originalmente los proyectos aeroportuarios se planifican en zonas no urbanizadas para no afectar a la población de las ciudades. No obstante, en la actualidad se ha propuesto la aplicación de la certificación LEED en este tipo de proyectos. Un ejemplo de ello en el país es el Aeropuerto de San Luis Potosí, que obtuvo dicha certificación en el año 2022 tras una expansión y remodelación, así como también la Terminal 4 del Aeropuerto Internacional de Cancún obtuvo la certificación en el 2017.

Expo Santa Fe

En la Alcaldía Álvaro Obregón se encuentra la Expo Santa Fe (*figura 31*), la cual es un espacio para realizar convenciones, exposiciones, espectáculos o eventos en general, que se inauguró en el 2002. El recinto cuenta con 32,400 m² y por su tipo de techumbre, genera una de las pocas ICU presentes en la alcaldía Álvaro Obregón, aunque es común que el reflejo del sol en las ventanas de los múltiples edificios corporativos y hoteles contribuyan a que la temperatura de la zona aumente durante el día.

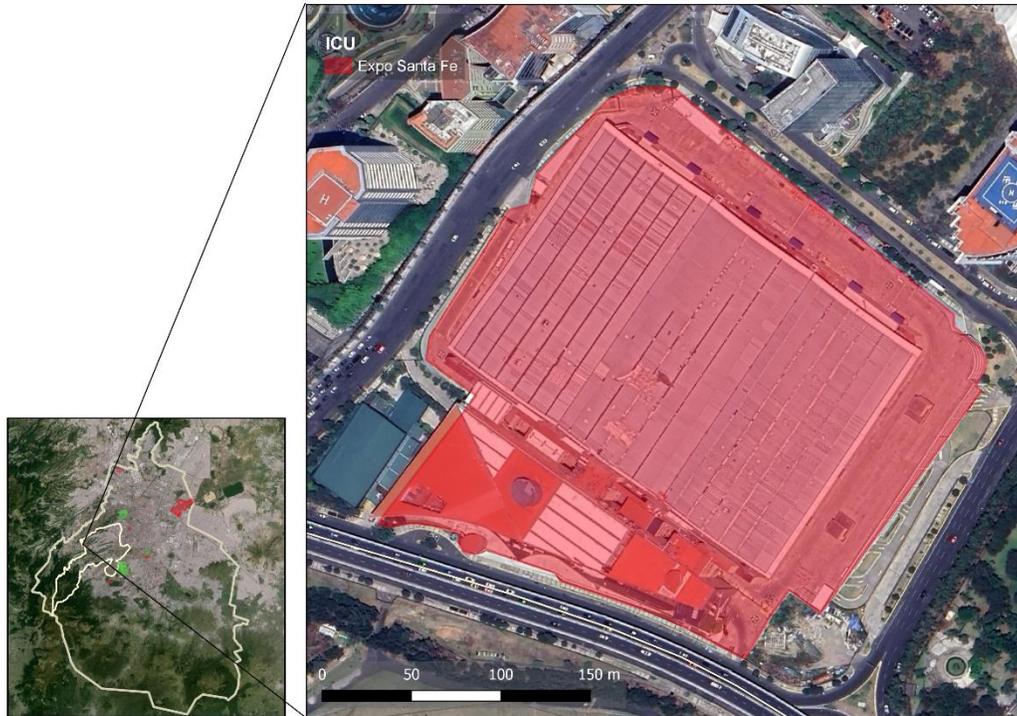


Figura 31. ICU de la Expo Santa Fe. Elaboración propia.

En este punto se registraron valores máximos de LST de 41.69°C para el 2022 y de 39.50°C para el 2024, mientras que para el NDVI se registraron valores mínimos de -0.0457 para el 2022 y -0.0366, indicando que la vegetación es nula al ser únicamente una techumbre que absorbe calor (*figura 32*).

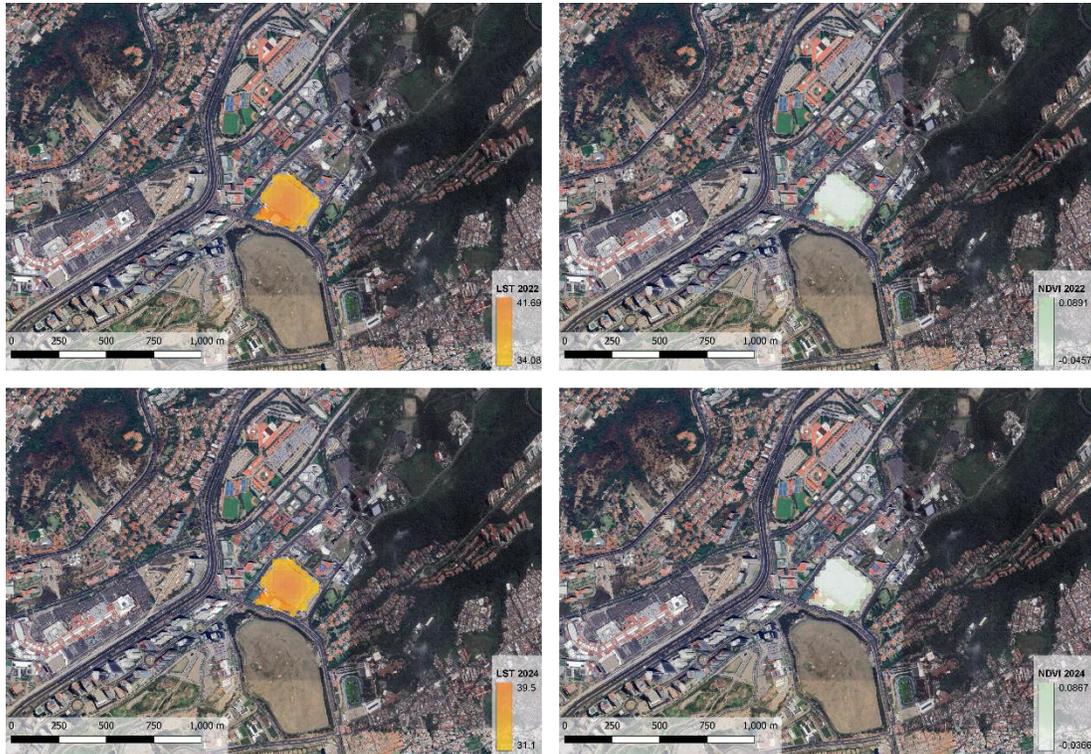


Figura 32. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la Expo Santa Fe (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Comúnmente los centros de convenciones y exposiciones han optado por adoptar medidas para obtener certificaciones LEED, tal es el caso del edificio Centro Internacional de Exposiciones y Convenciones-World Trade Center (CIEC-WTC), que en el año 2013 obtuvo la certificación LEED Oro y en 2019 se recertificó en operaciones y mantenimiento (Bioconstrucción y Energía Alternativa, 2024).

Paradero de Taxqueña - Central de Autobuses del Sur y Club Campestre

En la alcaldía Coyoacán se encuentran una ICU y una zona "fría" separadas únicamente por una avenida de alta afluencia vehicular y algunos predios de uso habitacional (*figura 33*). Estos dos puntos de interés son el Paradero de Taxqueña y la Central de Autobuses del Sur y el Club Campestre, respectivamente.



Figura 33. ICU del Paradero de Taxqueña y de la Central de Autobuses del Sur. Zona "fría" del Club Campestre de la Ciudad de México. Elaboración propia.

El Paradero de Taxqueña junto con la Central de Autobuses del Sur es un área que alberga múltiples modalidades de transporte, entre ellas la estación Tasqueña de la Línea 2 del Metro, el acceso al Tren Ligero, la Línea A del Trolebús y un paradero de microbuses que hacen que sea una zona de altas emisiones de CO₂ y, que en conjunto con los materiales de construcción utilizados y las vialidades a su alrededor, contribuyen al aumento de LST en la zona.

El Club Campestre de la Ciudad de México es un club privado que alberga varias amenidades para sus socios, pero se distingue especialmente por su campo de golf, el cual es el que aporta mayormente a que la LST del predio sea menor a la de sus alrededores por el amplio espacio cubierto con pasto y cuerpos de agua.

Al comparar los valores máximos de LST registrados en estos dos puntos se puede observar que existe una diferencia de 10 a 11°C entre un lugar y otro (*figura 34*). En cuanto al NDVI es evidente la presencia de vegetación sana en el Club Campestre, ya que se alcanzan valores máximos de 0.4816 en el 2022 y de 0.5149 en el 2024.

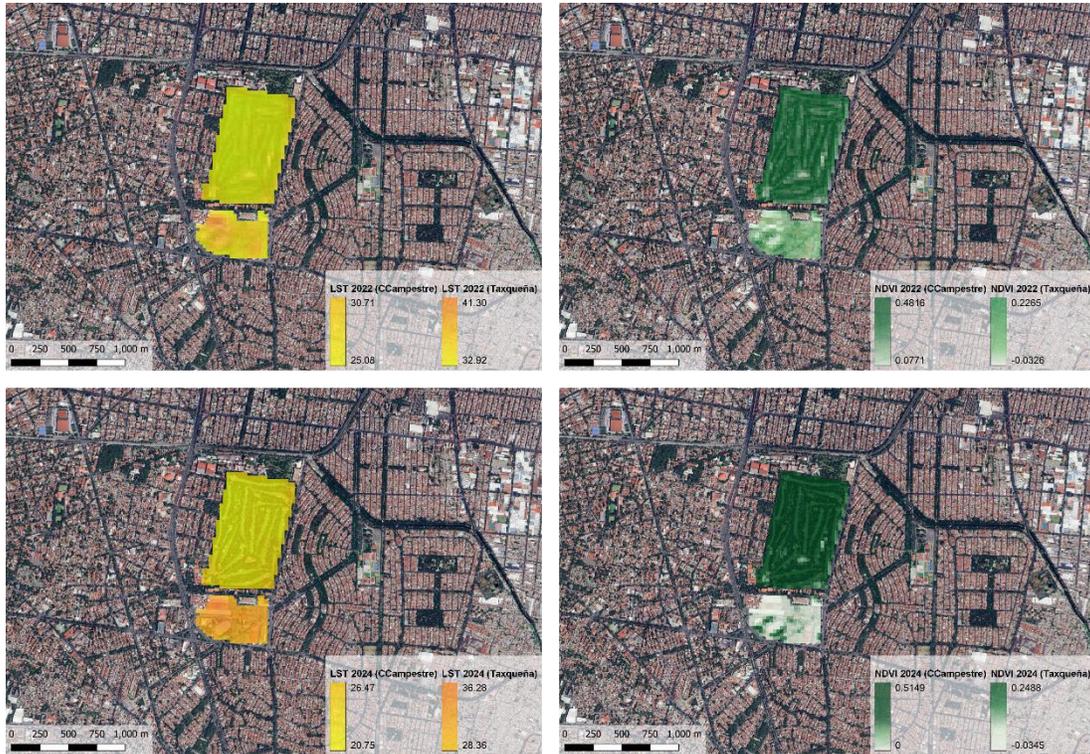


Figura 34. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del Paradero de Taxqueña y de la Central de Autobuses del Sur y del Club Campestre de la Ciudad de México (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

La comparativa de estos puntos permite notar la disparidad de los espacios vegetados provocada por la desigualdad social y la falta de espacios públicos agradables y naturados para los usuarios del transporte público y peatones en general.

Estacionamiento de Six Flags México

Six Flags México se encuentra ubicado en la alcaldía Tlalpan sobre la carretera Picacho-Ajusco y es un parque de diversiones inaugurado en el año 2000 que tiene una superficie de 45 Ha (figura 35).

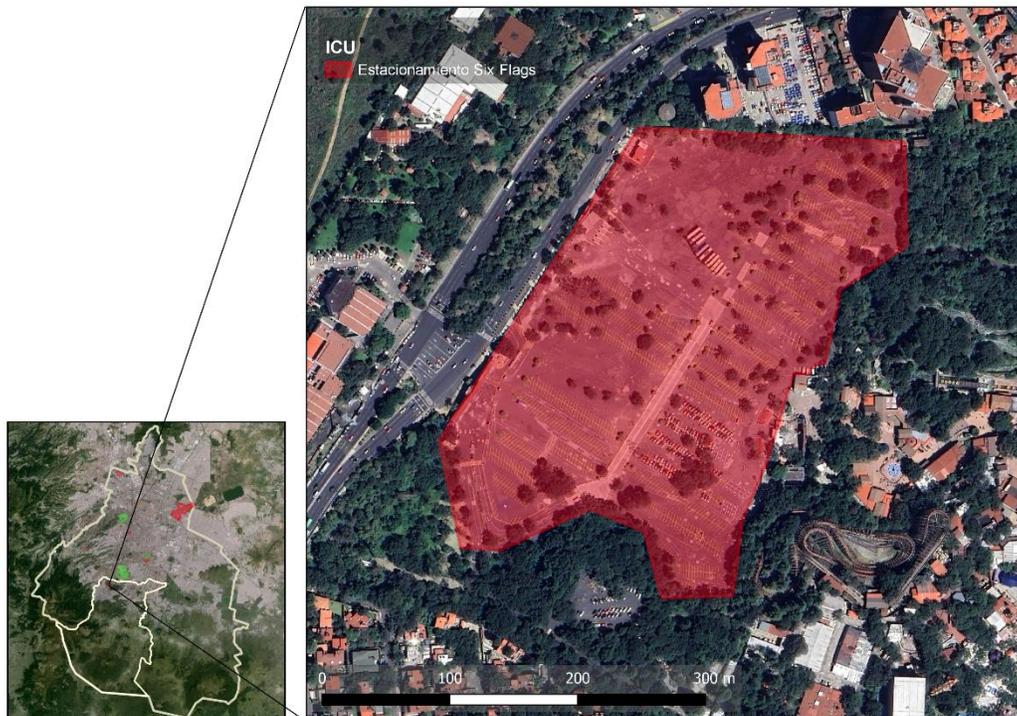


Figura 35. ICU del estacionamiento de Six Flags México. Elaboración propia.

Este punto alcanza valores de LST máximos de hasta 39.27°C en el 2022 y 33.46°C en el 2024 y los valores registrados de NDVI indican la presencia de vegetación escasa o enferma en la zona (figura 36), pero la ICU generada no llega a ser tan intensa como en el caso del AICM o los almacenes de Azcapotzalco debido a que el sitio está rodeada por bosque en toda su parte posterior y ayuda a mitigar en cierto punto los impactos que provoca la gran plancha de asfalto del estacionamiento.



Figura 36. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del estacionamiento de Six Flags México (2022 arriba y 2024 abajo).

Fórum Buenavista y biblioteca Vasconcelos

La elección de estos puntos de interés se debe a que son puntos en la alcaldía Cuauhtémoc donde se presentan ambos fenómenos en predios colindantes (*figura 37*). Fórum Buenavista es un centro comercial inaugurado en 2009 ubicado entre la Avenida Insurgentes Norte y Eje 1 Norte que se construyó sobre la Estación de Ferrocarriles, que actualmente es la terminal del tren Suburbano. Mientras que la Biblioteca Vasconcelos es un recinto bibliográfico con 38,094 m² de terreno inaugurado en 2006 que cuenta con el edificio central, una librería y jardines a su alrededor que permiten que la temperatura del entorno en esa área sea menor a la de las vialidades y alrededores inmediatos de la biblioteca. Adicional a las áreas verdes disponibles en el espacio, la biblioteca cuenta con un invernadero.



Figura 37. ICU de Fórum Buenavista y zona "fría" de la Biblioteca Vasconcelos. Elaboración propia.

El análisis de estos puntos permite comparar el fenómeno de *ICU* presentado debido al tipo de materiales con los que está construida la cubierta de Fórum Buenavista y la plancha de concreto que lo rodea con la zona "fría" que generan los jardines y áreas verdes distribuidos alrededor de la biblioteca (*figura 38*). A pesar de que los valores de NDVI registrados en la Biblioteca Vasconcelos (0.2229 en 2022 y 0.2716 en 2024) no indican vegetación completamente sana en el sitio debido al poco espacio ocupado por la misma, sí provocan una diferencia notable en la temperatura, existiendo una diferencia entre los valores máximos de LST de 2.47°C en el 2022 y de 4.69°C en el 2024.

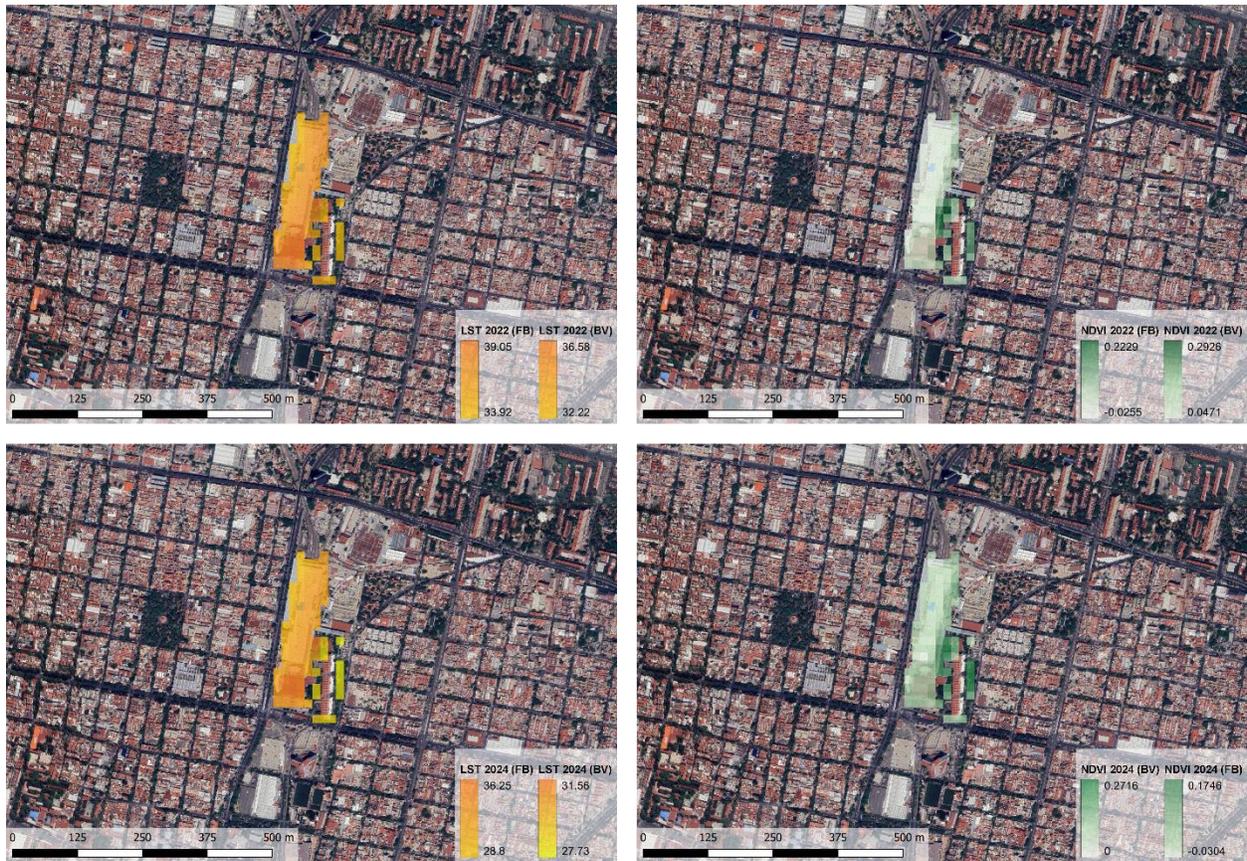


Figura 38. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de Fórum Buenavista y la biblioteca Vasconcelos (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

World Trade Center (WTC) México

El WTC se encuentra en la alcaldía Benito Juárez y es un complejo de usos mixtos que cuenta con múltiples espacios y oficinas, incluyendo al Centro Internacional de Exposiciones y Convenciones (CIEC) y al centro de espectáculos Pepsi Center-WTC. Este punto de interés fue clasificado como *ICU* debido a que presenta una diferencia de temperatura de hasta 8°C en comparación con sus alrededores (*figura 39*).

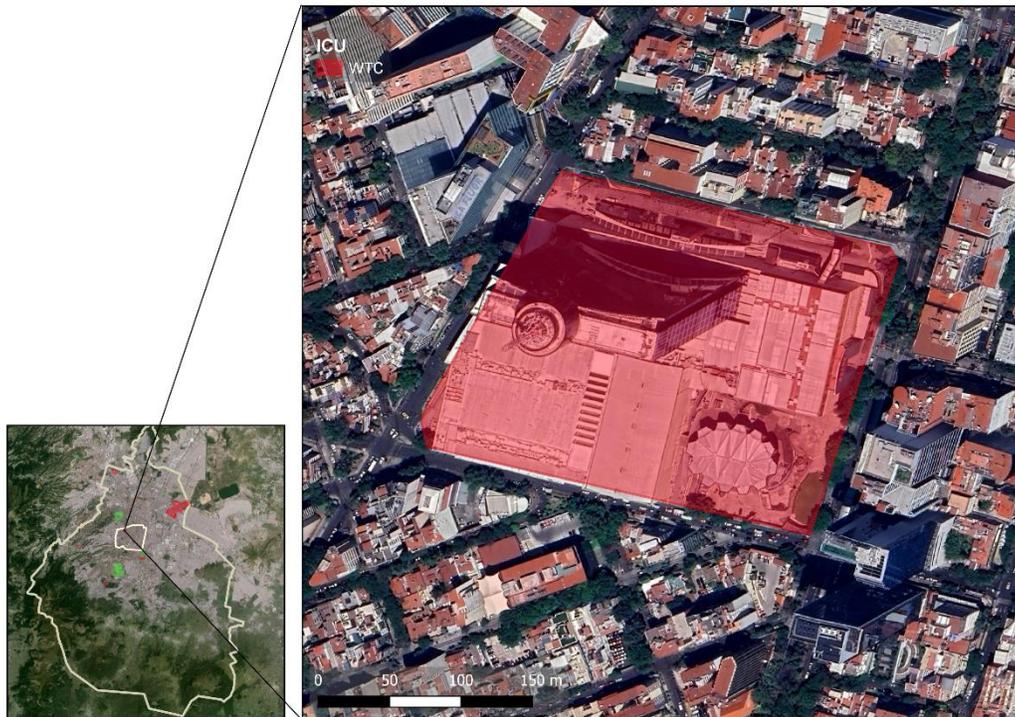


Figura 39. ICU del WTC México. Elaboración propia.

El motivo principal de la aparición del fenómeno en este punto es el reflejo del sol en las ventanas del edificio de 210 metros de altura, es decir, el material con el que está construido el edificio tiene un gran impacto en los efectos de temperatura de la zona, alcanzando valores máximos de LST de hasta 37.30°C en el 2022 y 34.43°C en el 2024 y la vegetación en la zona es casi nula, con excepción de los alrededores del edificio.



Figura 40. LST (izquierda) y NDVI (derecha) del WTC México (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Cabe mencionar que ni el CIEC ni el Pepsi Center-WTC contribuyen significativamente al aumento de LST de la cuadra que ocupa el predio, pero sí se ven afectados por el reflejo del sol en la torre. Tanto el CIEC como el Pepsi Center-WTC cuentan con certificación LEED.

Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)

La REPSA es un ecosistema con 237 Ha resguardadas por la UNAM ubicado dentro de Ciudad Universitaria (*figura 41*) donde habitan cerca de 300 especies de plantas nativas, 800 artrópodos, insectos y crustáceos, así como también 30 especies de mamíferos, entre otros vertebrados, lo que lo hace ser el ecosistema más variado en el Valle de México (Gaceta UNAM, 2019).



Figura 41. Zona fría de la REPSA. Elaboración propia.

Este punto de interés fue seleccionado debido a la gran área que abarca dentro de Ciudad Universitaria y por su aportación al microclima presente dentro de la Universidad, es decir, su variedad y cantidad de especies vegetales genera el efecto de zona "fría" en las inmediaciones del predio al amortiguar y controlar los efectos de temperatura que se pueden generar por la infraestructura presente. A su vez, la zona protegida propicia la recarga del acuífero, la disminución del ruido y la captación del CO₂.

Los valores máximos de NDVI registrados (0.4171 en el 2022 y 0.4329 en el 2024) indican la presencia de una vegetación variada y sana en comparación con los demás puntos estudiados, además de que ha sido conservada a lo largo del tiempo. Esto permite que la LST del sitio se mantenga con valores por debajo de los 38°C a pesar de que exista infraestructura vial dentro de Ciudad Universitaria (*figura 42*).

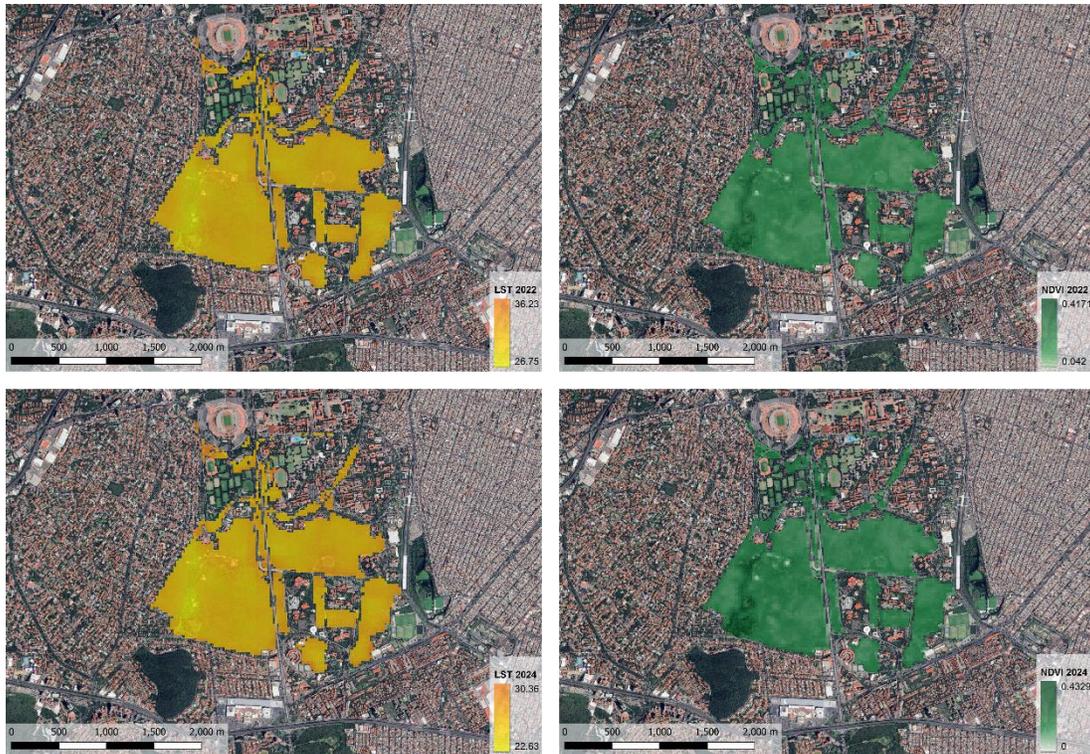


Figura 42. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la REPSA (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Es importante mencionar que la REPSA no solo proporciona un modelo de laboratorio vivo y natural para el estudio de especies y procesos evolutivos, sino que también representa un espacio libre donde las especies vegetales no requieren de riego (Krieger, P., 2021), es decir, representan un modelo hidrológico más sustentable que las plantas ornamentales que comúnmente se colocan en espacios públicos o privados con el fin de vender el modelo de ser un espacio más verde y sustentable, pero que solo logran hacer *greenwashing*¹ debido a que las plantas ornamentales colocadas en estos espacios llegan a consumir mucha más agua y cuidado de lo esperado, lo que finalmente resulta en espacios con vegetación muerta o mal conservada y suelos erosionados. Debido a esto, la conservación de este ecosistema es fundamental no solo para la UNAM, sino también para toda la zona urbana de la Ciudad de México.

¹ *Greenwashing*: promoción de falsas soluciones ante la crisis climática que distrae y retrasa acciones concretas y creíbles (ONU, 2024).

Primera Sección del Bosque de Chapultepec

En la alcaldía Miguel Hidalgo se encuentra la extensión de bosque más grande dentro de la zona urbana de la Ciudad de México (*figura 43*) albergando 686 Ha divididas en tres secciones (Pro Bosque Chapultepec, 2024).

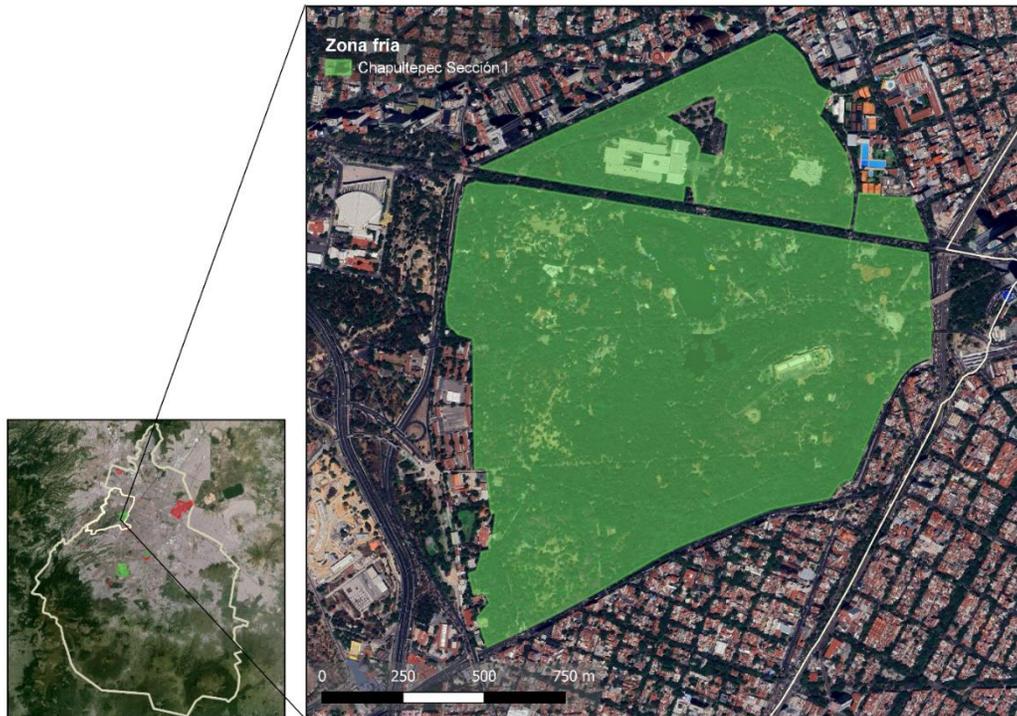


Figura 43. Zona "fría" en la Primera Sección del Bosque de Chapultepec. Elaboración propia.

Se identificó como zona "fría" a la Primera Sección del Bosque, ya que como se muestra en la *figura 44* se registraron valores máximos de NDVI de 0.4321 en el 2022 y de 0.4201 en el 2024 indicando una vegetación sana y conservando la LST por debajo de los 32°C en ambas fechas analizadas. El espacio cuenta con múltiples especies de árboles, lo que permite tener sombra y una temperatura agradable para los usuarios. Además de ser una zona altamente vegetada, cuenta con un cuerpo de agua, el cual también contribuye para mantener una temperatura favorable.

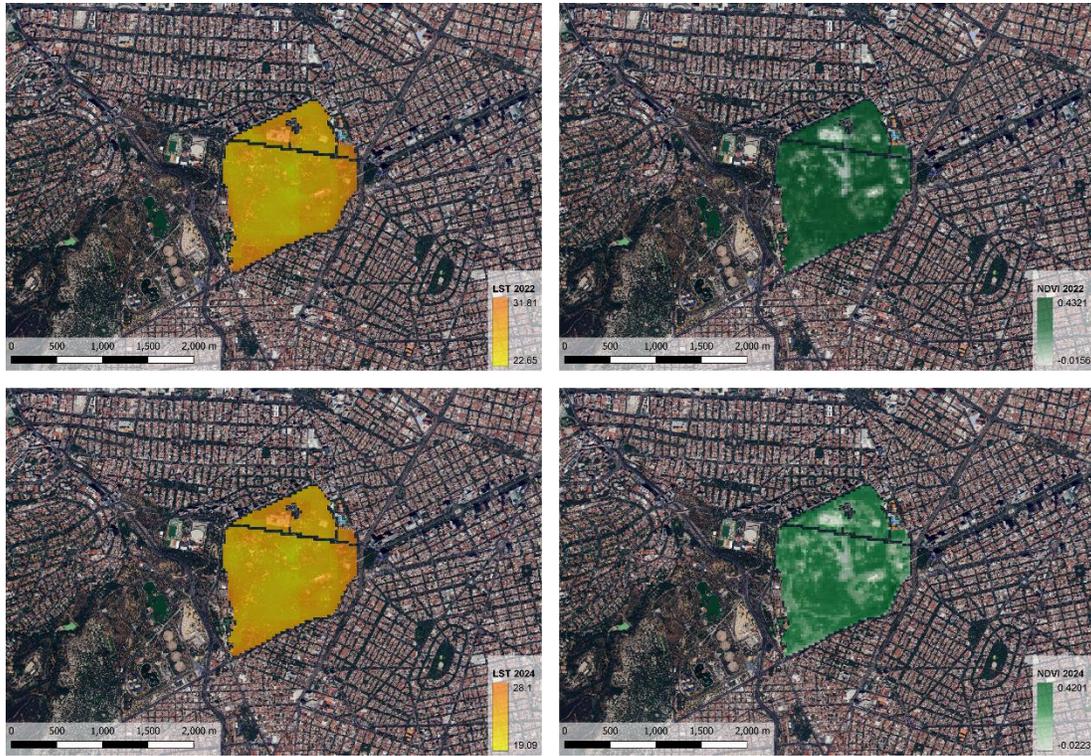


Figura 44. LST (izquierda) y NDVI (derecha) de la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (2022 arriba y 2024 abajo). Elaboración propia.

Mitigación de las islas de calor urbanas

El concepto de mitigación de *ICU* describe las estrategias, técnicas, medidas o acciones que tienen el fin de aminorar los efectos negativos de las altas temperaturas urbanas ocasionadas por las modificaciones de los entornos físicos de las ciudades.

La mitigación de los efectos de las *ICU* se logra mediante diferentes acciones, entre ellas: el incremento de la evapotranspiración, incrementando el albedo² de la superficie urbana, reduciendo la concentración de gases invernadero y de partículas contaminantes y mejorando la circulación del viento urbano (Sustana, et al., 2022). Con el fin de lograr dichas acciones es necesario tomar en cuenta distintos componentes como son:

- Los efectos de la vegetación en la atmósfera
- La presencia de cuerpos de agua en la configuración urbana
- El uso de un albedo alto y materiales adecuados
- El buen diseño de la configuración urbana
- Las políticas de mitigación bien pensadas y la concientización de la población

A continuación, se mencionan algunas de las principales estrategias, medidas y acciones para disminuir los efectos causados por las *ICU* y que van de la mano con los componentes mencionados anteriormente.

Áreas verdes y vegetación en espacios públicos

Los árboles y plantas, aunque sean pequeños, contribuyen significativamente a la creación de un entorno más fresco al reducir las temperaturas atmosférica y superficial (LST) a través de la sombra que proporcionan y el proceso de evapotranspiración.

Específicamente, las hojas verdes de todas las plantas absorben de la atmósfera gases de efecto invernadero como el SO_2 , NO_2 , O_3 y CO_2 , así como partículas suspendidas presentes en la atmósfera. Por otro lado, los árboles no solo ayudan a mitigar la contaminación por ruido, sino que también favorecen la disminución de la temperatura ambiente mediante la sombra que ofrece su follaje y la evapotranspiración.

Parques, camellones y corredores verdes

Es frecuente encontrar áreas vacías y áridas en entornos urbanos, por lo que resulta beneficioso considerar la planificación, recuperación e instalación de parques con vegetación nativa y xerófila en estos espacios. Esto contribuye significativamente al efecto de enfriamiento del área y a mitigar los efectos de *ICU*.

² Albedo: medida de la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar.

Un albedo alto significa que la superficie refleja más luz solar, mientras que si se tiene un albedo bajo significa que la superficie absorbe más luz solar. (Trevilla, M., 2023).

En la Ciudad de México, el gobierno capitalino está implementando una iniciativa que consiste en la creación y rehabilitación de la infraestructura ambiental para crear y regenerar espacios para fomentar la convivencia y promover el fortalecimiento del tejido social entre los habitantes de la Ciudad (*figura 45*). El objetivo inicial del programa fue rehabilitar 16 parques públicos y, entre 2019 y 2022, se han creado y restaurado más de mil 400 hectáreas de estos espacios (Gobierno de la Ciudad de México, 2023).



Figura 45. Recuperación del Parque Ecológico de Xochimilco con el Programa Sembrando Parques. Méndez, 2022.

Además de la creación y recuperación de parques, es recomendable plantar árboles y plantas adecuadas en banquetas, camellones y corredores para proporcionar sombra en las zonas peatonales (*figura 46*), por lo que es fundamental que en las ciudades se le de mayor prioridad a las banquetas y pasos peatonales que a las vialidades vehiculares, esto con el fin de tener más espacio peatonal y mayor superficie disponible para plantar árboles y arbustos.



Figura 46. Árboles en banquetas del corredor Roma-Condessa en la CDMX. Tinsa, 2022.

Vegetación en estructuras urbanas

Azoteas verdes

Una azotea verde se refiere a la colocación de todo tipo de vegetación en el techo de un edificio, adoptando a la vegetación como una parte integral de la estructura. Como cualquier otra zona vegetada, las azoteas verdes proporcionan un efecto refrescante a través de la sombra y la evapotranspiración. La LST de las azoteas verdes suele ser entre 15 – 45°C más fría que la LST de las azoteas convencionales, mientras que la temperatura atmosférica de los alrededores se enfría entre 2 y 5°C (Sultana, et al., 2022).

Para la instalación de las azoteas verdes es importante mencionar que se deben de colocar respetando un cierto sistema para que la estructura del edificio se mantenga segura y sin daños (figura 47). Principalmente, la estructura de las azoteas verdes se compone de cinco capas:

1. **Vegetación.** Su selección depende en el clima de la región, aunque es ampliamente recomendado que las especies colocadas sean nativas del sitio en donde se instalará la azotea.
2. **Sustrato.** Es el medio por el cual las plantas crecen, por lo que debe ser ligero y capaz de mantener la salud de las plantas sin fomentar la pérdida de nutrientes.
3. **Capa filtrante.** Contiene a las raíces y a la tierra/sustrato, pero permite que el agua pase. A su vez, almacena a las partículas pequeñas que puede contener el sustrato para que evitar que pasen a la capa drenante y se tape.
4. **Capa drenante.** Está compuesta por arena o granos grandes que permiten la acumulación de agua para su uso posterior, así como también alberga algunas raíces.
5. **Membrana impermeable.** Esta capa protege a la estructura del techo de la infiltración de agua para evitar problemas de humedad y daños estructurales.

Para que la azotea verde cumpla con la norma ambiental para la instalación de Sistemas de Naturación en la CDMX (NADF-013-RNAT-2017b), se consideran dos componentes más:

6. **Soporte base/estructural.** La función del soporte base es sostener a todas las demás capas y generar una pendiente para permitir que el agua fluya hacia un punto específico, es decir, que llegue al desagüe. En ocasiones el soporte base puede coincidir con el soporte estructural y se le agrega también la impermeabilización anti-raíz.
7. **Desagüe.** El desalojo del agua excedente del sistema se logra a través de la capa drenante, la pendiente del soporte base y de las bajadas de agua o desagües. El conjunto de estos elementos tiene la función de evacuar la totalidad del agua excedente de la superficie evitando su acumulación sobre la misma.

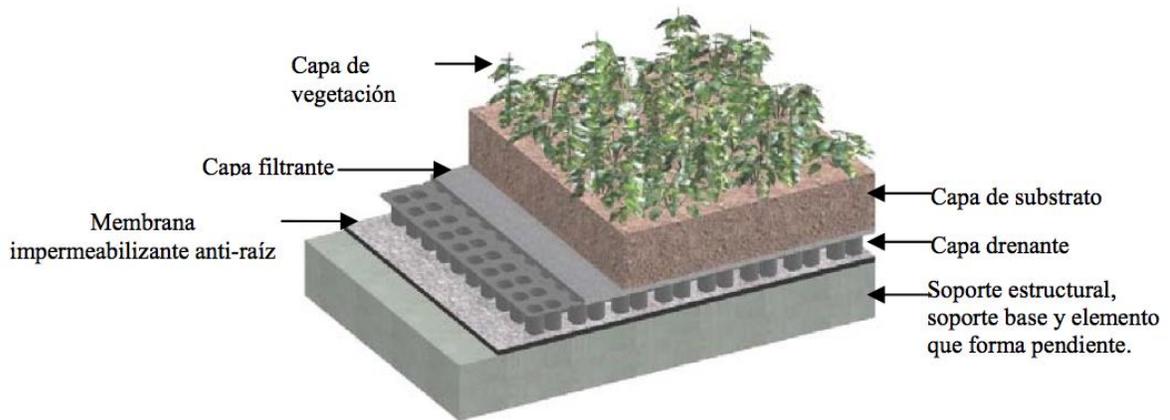


Figura 47. Componentes básicos de una azotea verde. Ramírez, 2011.



Figura 48. Azotea verde del edificio del INFONAVIT en CDMX. Díaz, 2022.

Adicional a las capas ya mencionadas, es importante agregar que las azoteas verdes aportan cierto peso a la estructura dependiendo de las especies vegetales que se coloquen y de su extensión, por lo que para su colocación es necesario considerar la carga que aportará desde la etapa de diseño de la estructura. Si se tiene planeado colocar la azotea verde en un edificio ya construido, es importante verificar si la carga para la que está diseñado el edificio

puede soportar la carga que el Sistema de Naturación aportará, tomando en cuenta que la NADF-013-RNAT-2017b tiene como requisito que, si se va a colocar un Sistema de Naturación en algún techo de la CDMX, la vegetación debe cubrir al menos el 70% de la superficie, un ejemplo de esto es la azotea verde del edificio del INFONAVIT en la CDMX (figura 48).

Dada la situación de la planeación urbana en la Ciudad de México y debido al alto crecimiento poblacional, predominan los edificios habitacionales donde la mayoría de las veces el espacio de la azotea está ocupado por bodegas, centros de lavado o áreas sociales (rooftops), por lo que el término azotea verde puede evolucionar a "balcón verde" convirtiéndose en parte de una fachada verde, siendo una práctica que se ha estado adoptando por algunos habitantes de la CDMX (*figura 49*).



Figura 49. Balcón verde en CDMX. Carrillo, 2024.

Actualmente, Chicago es la ciudad con más azoteas verdes en el continente americano. Esto debido a que desde el año 2004 (Tan, 2022) el ayuntamiento exige que todos los nuevos edificios en los que se utilizan fondos públicos obtengan la Certificación LEED, lo que generalmente incluye colocar una azotea verde. Para incentivar esto, el ayuntamiento otorga los permisos necesarios para construir y operar de manera más rápida (Estévez, 2013).

Muros verdes

Los muros verdes son una pared vertical cubierta intencionalmente con algún medio de cultivo. Su función es prácticamente la misma que la de las azoteas verdes y ambas formas de mitigación pueden ser complementarias.

Para su instalación es fundamental colocar paneles que sostengan a la vegetación, a diferencia de las fachadas verdes que no requieren de instalaciones adicionales para el crecimiento de las especies. Se pueden instalar de manera continua sobre un panel o de forma modular (*figura 50*).



Figura 50. Tipos de muros verdes: continuo (izquierda) y modular (derecha). Ávila-Hernández, et al., 2023.

Es importante mencionar que, este tipo de solución se puede instalar tanto en el interior (*figura 51*) de las estructuras, como en el exterior (*figura 52*). Al instalarlas en el interior de los espacios, permite filtrar y limpiar el aire que los usuarios respiran, ayudando a disminuir los riesgos en la salud de las personas.



Figura 51. Muro verde interior. Aquatopia, 2024.



Figura 52. Muro verde exterior en el Musée du Quai en París, Francia. Heniak, 2020.

Fachadas verdes

Las fachadas verdes son una de las acciones de mitigación más fáciles de implementar, ya que consisten en permitir el crecimiento de plantas trepadoras en determinada fachada o muro exterior o interior de algún espacio. Su gran ventaja es que ocupa muy poco espacio y no requiere de una instalación estructural adicional, como sucede con las azoteas y muros verdes. Estas se pueden instalar de tres formas distintas (*figura 53*): directamente en el muro terminado (a), indirectamente (b) al colocar otra capa de concreto o panel sobre el muro terminado y dejar

que la vegetación se esparza por este medio, o indirectamente dejando un canal de ventilación entre el muro terminado y la superficie donde crece la vegetación (c).

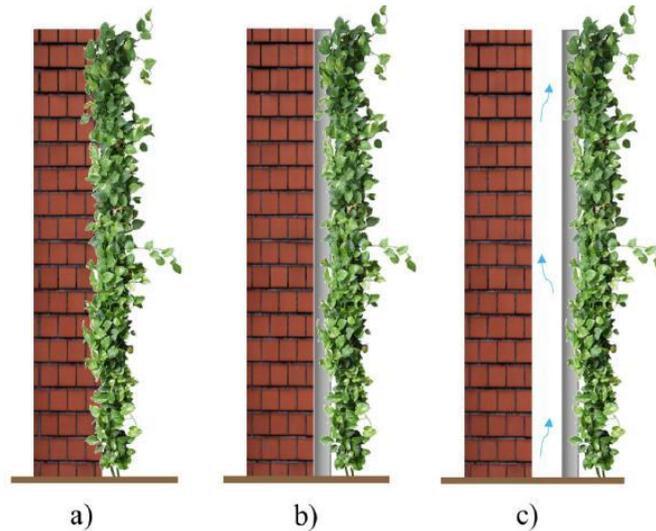


Figura 53. Tipos de instalación de fachadas verdes. Ávila-Hernández, et al., 2023.

Una de sus principales aportaciones es que reduce el consumo de energía al funcionar como una capa aislante que permite mantener una temperatura más fresca en el interior de los edificios, además de ayudar mejorar la calidad del aire exterior al contener a las partículas suspendidas y algunos contaminantes (figuras 54 y 55).



Figura 55. Fachada verde. May, 2018.

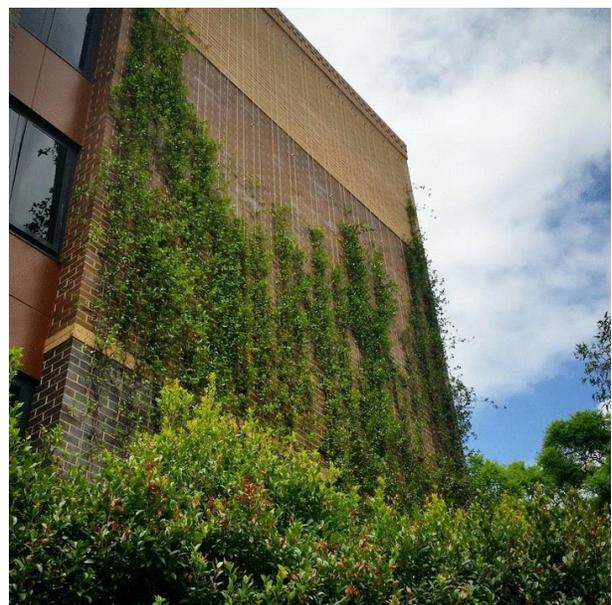


Figura 54. Fachada verde con plantas trepadoras. Bottero, 2018.

Cubiertas de agua

Las superficies cubiertas por agua no incrementan la temperatura en gran medida en comparación con el resto de las áreas urbanas. Al contrario, las cubiertas de agua proporcionan una gran cantidad de evaporación, lo que hace que aumente la humedad y se incremente la circulación del viento. Debido a esto, la evaporación en grandes cantidades y la alta velocidad del viento provocada por la presencia de cuerpos de agua pueden ayudar a reducir la temperatura del aire en la configuración urbana. Incluso, la alta capacidad de absorción de calor del agua puede ayudar a reducir aún más la temperatura urbana.

Para efectos de mitigación de la *ICU*, se pueden considerar dos categorías dentro de este término: los cuerpos de agua y los elementos urbanos con agua.

Cuerpos de agua

Dentro de esta clasificación se encuentran todos los cuerpos de agua naturales como ríos, lagos o humedales presentes en el entorno urbano. El efecto de enfriamiento que estos proporcionan está directamente relacionado con el tamaño y distribución del cuerpo de agua, es decir, un cuerpo de agua grande, como un lago, puede tener un efecto de enfriamiento y mitigación mayor que el de un cuerpo pequeño; pero un grupo de pequeños lagos distribuidos de manera eficiente puede aportar también efectos significativos de mitigación y enfriamiento urbano.

Los cuerpos de agua en combinación con vegetación en entornos urbanos tienen beneficios para la mitigación de la *ICU*. Tal es el caso de varios parques de la Ciudad de México, como la Primera Sección del Bosque de Chapultepec (*figura 56*) mencionada como zona "fría" en el apartado anterior.



Figura 56. Combinación de cuerpos de agua y vegetación en la Primera Sección del Parque de Chapultepec. Gaxiola, 2016.

Elementos urbanos con agua

Algunos de los elementos urbanos con agua que ayudan a mejorar el confort térmico de los habitantes son las fuentes en espacios públicos (*figura 57*) o la captación de agua de lluvia y su redireccionamiento a algún cuerpo de agua natural o artificial, como estanques o humedales inducidos artificialmente.



Figura 57. Fuente en el Parque de la Bombilla en la CDMX. Escapadas.mx, 2024.

Es importante mencionar que la mitigación de la *ICU* con cubiertas, cuerpos o elementos de agua es más eficiente en zonas urbanas con climas secos, ya que en lugares con climas más húmedos pueden llegar a causar malestar térmico debido al exceso de humedad.

Materiales reflejantes

El uso de materiales, impermeabilizantes o pinturas reflejantes permiten que la radiación emitida por el sol se disipe más rápido al no acumularse el calor en la estructura del techo y se evite o reduzca la formación de *ICU* (*figura 58*).

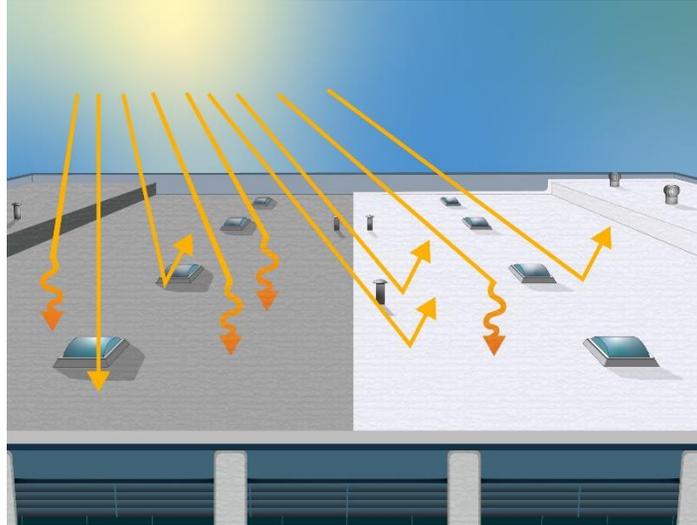


Figura 58. Efectos de los materiales reflejantes en techos. Arup, 2022.

Además de evitar la formación de *ICU*, el uso de este tipo de materiales permite que la temperatura interior del edificio se mantenga fresca al no absorber el calor, provocando un menor consumo de energía en *A/C* y que se reduzca la *CGEI* (*figura 59*).



Figura 59. Techos con pintura o materiales reflejantes. American Weatherstar, 2022.

Geometría urbana

La geometría de las estructuras urbanas puede afectar el proceso de calentamiento de las estructuras urbanas, por lo que es importante su consideración para las estrategias de mitigación. Modificar o mejorar las características principales del entorno urbano puede brindar oportunidades de mitigar de forma más eficaz los efectos de la *ICU* y promover el confort térmico. La planificación urbana debe estar de acuerdo con las condiciones climáticas regionales para que el efecto de sombra y la circulación del viento sean más eficientes.

Algunas de las estrategias principales son:

1. **Factor de cielo visible.** Se refiere a la proporción entre el área de cielo visible desde un punto específico y el área total del cielo. Este factor es crucial en los modelos de radiación solar urbana, ya que los edificios que en una calle pueden bloquear significativamente la radiación solar que llega a los espacios, pero también pueden obstaculizar el flujo de aire entre las vías y las zonas peatonales (Miao, et al., 2020).
2. **Altura de los edificios.** Afecta directamente en el flujo del aire a través de los edificios y, por ende, en la ventilación y reducción o aumento de la temperatura del entorno urbano.
3. **Diseño pasivo para confort térmico.** Integrar estrategias pasivas como la ventilación e iluminación natural, la orientación adecuada de los edificios, la ventilación cruzada, entre otras técnicas, ayuda a mantener el confort térmico en los espacios interiores y a reducir el consumo de energía.

Por lo tanto, la planificación urbana debe realizarse de tal manera que se busque obtener los máximos beneficios mejorando la sombra proporcionada por los edificios, mejorando la circulación del aire y reduciendo la acumulación de calor.

Tomando en cuenta lo anterior e integrándolo al caso de estudio de la CDMX, es muy difícil modificar la geometría urbana actual, por lo que aplicar estas estrategias resulta complicado en una ciudad ya establecida.

Políticas y concientización

La construcción e implementación de políticas de mitigación urbanas en las ciudades de forma individual son esenciales para disminuir el efecto de *ICU* a gran escala. Las autoridades son responsables de elaborar políticas y estrategias adecuadas según las demandas específicas de cada ciudad y el público en general debe ser consciente de los efectos de las *ICU* y de los métodos de mitigación existentes y accesibles para ellos (Imam y Banerjee, 2016). Algunas de las recomendaciones y acciones bajo este término son:

- Uso de energías renovables
- Uso eficiente de la energía
- Implementación de corredores verdes
- Normatividad en medios de transporte
- Programas e iniciativas gubernamentales de reforestación y conservación de espacios verdes
- Programas ambientales basados en incentivos

A manera de resumen, se presenta la *tabla 12* donde se mencionan las ventajas y desventajas de cada método, técnica o acción de mitigación enunciada en los apartados anteriores.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de los métodos, técnicas o acciones de mitigación enunciados. Elaboración propia.

Método, técnica o acción de mitigación		Ventajas	Desventajas
Áreas verdes y vegetación espacios públicos	Parques, camellones y corredores verdes	Infiltración y recarga de los acuíferos Reducción de la contaminación del aire y ruido Mejora en la calidad de vida de los habitantes y de la apariencia de los espacios	Incremento de la humedad en zonas con clima húmedo Costos por mantenimiento de las especies y de los espacios Daños en infraestructura si las especies seleccionadas no son las adecuadas
Vegetación en estructuras urbanas	Azoteas verdes	Reducción en el consumo de energía Reducción de la temperatura y contaminación	Daño a las estructuras si no se instalan correctamente Inversión inicial costosa Costos y tiempos de mantenimiento
	Muros verdes	Impulsar la iniciativa de la captación de agua de lluvia Mejora de la apariencia de los espacios	
	Fachadas verdes	Protege a los edificios de lluvias fuertes	
Cubiertas de agua	Cuerpos de agua	Reducción de temperatura Aumento de la velocidad del viento	Exceso de humedad en zonas con climas húmedos Costos por mantenimiento y limpieza
	Elementos urbanos con agua	Infiltración y recarga de los acuíferos Mejora de la apariencia del espacio	
Materiales reflejantes		Reducción en el consumo de energía Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero Mejora en el confort térmico del espacio	Pérdida de la temperatura del recinto en temporadas frías Costos de inversión y mantenimiento Accidentes causados por deslumbramiento
Geometría urbana		Efectos de ventilación Sombra Bajo impacto en las condiciones de vida de los habitantes	Difícil de modificar las estructuras urbanas ya establecidas
Políticas y concientización		Incentivar a la población a sumarse en aplicar las acciones Recuperación y conservación de espacios Reducción de la temperatura y GCEI	Costos de inversión para los incentivos Costos de mantenimiento Creación de entidades gubernamentales para el monitoreo de avances e implementaciones

Tomando en cuenta las acciones de mitigación mencionadas y aplicándolas al caso de estudio, lo más recomendable para la CDMX es adoptar las medidas que involucran la implementación de infraestructura verde en edificios y espacios públicos para la mitigación del fenómeno de *ICU*, como es el caso de azoteas, muros, fachadas y corredores verdes, así como camellones y recuperación con especies adecuadas de parques y espacios públicos.

Además de las medidas mencionadas, es crucial que el Gobierno de la Ciudad de México promueva y coordine estas acciones para obtener mejores resultados y llevar un control adecuado de lo ejecutado. Si los ciudadanos actúan de manera aislada, no se puede tener un control cuantitativo del impacto de las acciones individuales.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

A través del procesamiento y análisis de imágenes satelitales obtenidas de los satélites Landsat 8 y 9, se identificaron siete Islas de Calor Urbanas (ICU) en la Ciudad de México, ubicadas en puntos específicos como los almacenes de Azcapotzalco, el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), Expo Santa Fe, el Paradero Taxqueña – Central de Autobuses del Sur, el estacionamiento de Six Flags México, Fórum Buenavista y el WTC México. Además, se detectaron cuatro zonas caracterizadas como “frías”: el Club Campestre, la Biblioteca Vasconcelos, la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) y la Sección I del Bosque de Chapultepec. El análisis y comparación de estos puntos revelaron una relación directa entre el aumento de la temperatura superficial terrestre (LST) y la limitada o nula presencia de vegetación en las zonas estudiadas, evaluada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Este análisis confirmó que uno de los efectos característicos de las ICU es la propagación de calor hacia áreas o predios vecinos, generando un aumento de temperatura en las zonas aledañas. La investigación sugiere que una de las estrategias más efectivas para mitigar este fenómeno es la introducción o preservación de vegetación en las áreas afectadas o en sus proximidades, ya que la vegetación contribuye a regular las temperaturas locales y reducir la intensidad de las ICU.

Es importante señalar que esta investigación se basó exclusivamente en el método de percepción remota para la obtención de resultados. Por lo tanto, futuras investigaciones podrían ampliar el análisis de estas áreas de interés mediante la implementación de metodologías adicionales. Se recomienda realizar mediciones in situ, las cuales permitirían capturar datos de LST y NDVI en distintos momentos del día o, idealmente, en diversas épocas del año, superando así las limitaciones del uso exclusivo de la percepción remota.

En cuanto a los métodos, técnicas o acciones de mitigación recomendadas, aunque no se aplicó ninguna de manera directa en los puntos estudiados, se sugieren las opciones más adecuadas para su implementación en el contexto específico de la Ciudad de México. Asimismo, otra línea de investigación podría centrarse en aplicar alguna técnica de mitigación en uno de los puntos analizados y combinar el uso de percepción remota con mediciones in situ para evaluar el impacto de dicha técnica en la reducción del efecto de las ICU.

Para abordar el fenómeno de las ICU es esencial adoptar un enfoque multidisciplinario. Esto implica la colaboración entre agentes políticos, sociales y especialistas de diversas disciplinas, incluyendo urbanistas, paisajistas, ingenieros, arquitectos, sociólogos y biólogos, entre otros, en los temas de reforestación y planificación urbana. El problema de las ICU es demasiado complejo para ser gestionado por una sola área o disciplina, y requiere soluciones integrales y coordinadas. La sobrepoblación de la CDMX implica un desafío significativo para la solución de los problemas ambientales y climatológicos. Una posible solución es la descentralización de industrias y oficinas gubernamentales para detener la concentración poblacional en un mismo

sitio. En cuanto a los materiales de construcción, es completamente inviable derrumbar todo lo existente; sin embargo, se pueden implementar pequeños cambios que generen impactos positivos en la temperatura, el confort, la salud y la convivencia urbana. Estos cambios pueden incluir el uso de materiales reflectantes y la incorporación de vegetación y espacios verdes en la infraestructura actual. La adecuada selección de especies vegetales en las áreas verdes puede reducir la LST y la temperatura atmosférica en zonas urbanas. En corredores y parques, se pueden implementar biofiltros o humedales artificiales que faciliten la infiltración del agua y la recarga de mantos acuíferos. Estas medidas no solo combaten las *ICU*, sino que también mejoran la gestión del agua en la ciudad.

Aunque es complicado modificar la estructura urbana actual, se puede proponer a nivel legislativo que los nuevos edificios y plazas comerciales sean diseñados con la carga admisible adecuada para la implementación de azoteas verdes desde su etapa de planeación. Ejemplos como el de Chicago, donde la legislación requiere dejar espacios libres para azoteas verdes, pueden servir de modelo. En comparación con otras ciudades como Bogotá, donde se están convirtiendo vialidades en peatonales, la alta densidad poblacional de la CDMX hace que esta solución sea poco viable. No obstante, la iniciativa de mejorar el servicio de transporte público podría disminuir significativamente el uso de vehículos personales, lo que también contribuiría a la reducción de las *ICU*.

En las zonas de la ciudad que se están desarrollando, es crucial evitar repetir los errores de la planificación urbana actual. La participación de agentes políticos en la planificación inicial puede asegurar un desarrollo urbano más sostenible y adaptado a las necesidades modernas. Así mismo, promover la conservación de áreas con suelos de conservación, además de la recuperación de parques y camellones es fundamental, lo cual puede ser logrado mediante la implementación de programas gubernamentales como es el caso del programa ya implementado: *Sembrando Parques*.

En pocas palabras, las *ICU* en la Ciudad de México requieren de estrategias integrales y colaborativas que involucren múltiples disciplinas y actores, desde la planificación y gestión urbana hasta la implementación de soluciones sostenibles y adaptativas. Solo a través de un esfuerzo concertado se podrán mitigar eficazmente los efectos adversos de las *ICU* y mejorar la calidad de vida en la ciudad.

Referencias

1. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, INEGI. (2021). *Censo de población y vivienda 2020*. México.
2. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2022). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2019*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.
3. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC. (2022). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2020*. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. pp. 124 – 140.
4. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2023). *Normatividad. Gobierno de la Ciudad de México, Calidad del Aire*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>
5. PNUD. (2020). *What are the Sustainable Development Goals? Goal 11: Sustainable Cities and Communities*. Sitio web: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/sustainable-cities-and-communities>
6. Consejo Nacional de Población. Gobierno de México. (2001). *La población de México en el Nuevo Siglo: La distribución territorial de la población en México*. Gobierno de México. pp. 103 – 116. Sitio web: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/la-poblacion-de-mexico-en-el-nuevo-siglo>
7. Ruíz, C. (2021). *Contaminación atmosférica: efectos en el cambio climático y la salud en la Ciudad de México*. Revista de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. Sitio web: <http://revistafyl.filos.unam.mx/contaminacion-atmosferica-efectos-en-el-cambio-climatico-y-la-salud-en-la-ciudad-de-mexico/>
8. Secretaría del Medio ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (s/f). *Estrategia local de acción climática 2021–2050. Programa de Acción climática de la Ciudad de México 2021–2030*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD007019.pdf>
9. Consejo de Evaluación del Desarrollo Social de la Ciudad de México. (2020). *Ciudad de México 2020. Un diagnóstico de la desigualdad socio territorial*. Gobierno de la Ciudad de

México. <https://www.evalua.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DIES20/ciudad-de-mexico-2020-un-diagnostico-de-la-desigualdad-socio-territorial.pdf>

10. Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Portal de datos abiertos: Suelo de conservación*. Sitio web: <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/suelo-de-conservacion>
11. Gobierno de la Ciudad de México. (2020). *Portal de datos abiertos: Uso de suelo y vegetación 2020, Ciudad de México*. Sitio web: <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/uso-de-suelo-y-vegetacion-2020-ciudad-de-mexico>
12. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2018). *Respira la vida Ciudad de México: Calidad del Aire*. Gobierno de la Ciudad de México. <http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/breatheLife/calidadAire.html>
13. Kalach, A. (2010). *México. Ciudad Futura*. Ciudad de México, México. DN3 Editores. ISBN: 978-841-511-805-3
14. Kalach, A., Palomar, J. (2012). *Atlas de Proyectos para la Ciudad de México*. Ciudad de México, México. ARQUINE. ISBN: 978-607-516-176-1
15. Jauregui, E. (1997). *Heat Island Development in Mexico City*. Pergamon, Atmospheric Environment Vol. 31, No. 22, pp. 3821 – 3831. ISSN 1352-2310, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)
16. USGS. (2023). *What is remote sensing and what is it used for?* Sitio web: <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used#:~:text=Remote%20sensing%20is%20the%20process,typically%20from%20satellite%20or%20aircraft>
17. Barradas, V., Miranda, J., Esperón-Rodríguez, M., Ballinas, M. (2022). *(Re)Designing Urban Parks to Maximize Urban Heat Island Mitigation by Natural Means*. *Forests* 2022, 13, 1143. <https://doi.org/10.3390/f13071143>
18. SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, SEMARNAT. (2021). *Programa de gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021 – 2030)*. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2021-2030/>
19. INEGI. (2024). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. Sitio web: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

20. Ballinas, M. (2011). *Mitigación de la Isla de Calor Urbana: Estudio de caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México). Repositorio UNAM, http://132.248.9.195/ptd2012/abril/0678897/0678897_A1.pdf
21. Ballinas, M. (2016). *Mitigación de la Isla de Calor Urbana: Un modelo general*. (Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México). Repositorio UNAM, <http://132.248.9.195/ptd2016/noviembre/0753479/0753479.pdf>
22. Campbell, J.B., Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. The Guildford Press, Nueva York, EUA.
23. Rizwan, A., et al. (2007). *A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Islands*. Journal of Environmental Sciences, 20 (2008) 120 – 128. ISSN 1001 – 0742, CN 11 – 2629/X.
24. Chang, C.R., et al. (2006). *A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks*. Landscape and Urban Planning 80 (2007) 386 – 395. doi: 10.1016/j.landurbplan.2006.09.005
25. Garzón, J., et al. (2021). *A Remote Sensing Approach for Surface Urban Heat Island Modeling in a Tropical Colombian City Using Regression Analysis and Machine Learning Algorithms*. Remote Sens. 2021, 13, 4256. <https://doi.org/10.3390/rs13214256>
26. Wang, G., et al. (2008). *An Assessment of Urban Heat Island Effect Using Remote Sensing Data*. Marine Science Bulletin, 10 (2), 14 – 25.
27. Grover, A., Singh, R.B. (2015). *Analysis of Urban Heat Island (UHI) in Relation to Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Comparative Study of Delhi and Mumbai*. Environments 2015, 2, 125 – 138. doi: 10.3390/environments2020125
28. Osibanjo, O.O., et al. (2020). *Anatomy of the March 2016 ozone smog episode*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117945>
29. Myrup, L.O. (1969). *A Numerical Model of the Urban Heat Island*. Journal of Applied Meteorology, Volume 8, pp. 908 – 918.
30. Ballinas, M. (2021). *Adapt the urban vegetation of Mexico City to the actual necessities. A reflection*. Oikos= 24 Instituto de Ecología, UNAM. <http://132.248.49.112/oikos3.0/index.php/todos-los-numeros/498-vegetacion-urbana-de-la-cdmx>

31. Vargas, N., Magaña, V. (2020). *Climatic risk in the Mexico City metropolitan area due to urbanization*. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644>
32. Mushore, T., et al. (2022). "Cool" Roofs as a Heat-Mitigation Measure in Urban Heat Islands: A Comparative Analysis Using Sentinel 2 and Landsat Data. *Remote Sens.* 2022, 14, 4247. <https://doi.org/10.3390/rs14174247>
33. Lemoine-Rodríguez, R., et al. (2022). *Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city*. *Urban Forestry & Urban Greening* 74 (2022) 127633. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>
34. Soltani, A., et al. (2017). *Daily Variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide*. *Frontiers of Architectural Research* (2017) 6, 529-538. <https://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.001>
35. Wang, C., et al. (2022). *Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions*. *Urban Forestry & Urban Greening* 74 (2022) 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>
36. Su, Y., et al. (2022). *Estimating the cooling effect magnitude of urban vegetation in different climate zones using multi-source remote sensing*. *Urban Climate* 43 (2022) 101155. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101155>
37. Bonifacio-Bautista, M., et al. (2023). *Estimation of anthropogenic heat release in Mexico City*. *Urban Climate* 43 (2022) 101158. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101158>
38. Sobrino, J.A., et al. (2013). *Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal Remote Sensing*. *International Journal of Remote Sensing*, 34:9-10, 3177 – 3192. <https://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
39. Kavya, Dhir. (2021). *Evaluation of Urban Heat Island Effect in Cybercity, New Delhi using a 3D Urban Microclimate Model: Envi-Met*. Masters' thesis, University of Arizona, Tucson, USA.
40. Barrera-Alarcón, I. G., et al. (2022). *The surface urban heat island and its manifestation in the urban structure of Mexico City*. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3) (pp. 312–330). <https://doi.org/10.37636/recit.v53312330>
41. Moreno, M. (1992). *Bibliografía sobre Climatología urbana: la "isla de calor", I*. *Revista de Geografía*, Universidad de Barcelona. ISSN 0048-7708, N.º 24, 1990, pp. 99-109.
42. Moreno, M. (1992). *Bibliografía sobre Climatología urbana: la "isla de calor", II*. *Revista de Geografía*, Universidad de Barcelona. ISSN 0048-7708, N.º 24, 1990, pp. 111-119.

43. Manzanilla-Quiñonez, U. (2022). *Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México*. Desde el Herbario, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. ISSN: 2395-8790, N.º 14, 2022, pp. 178–186. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
44. Barrera, I., et al. (2022). *La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México*. Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Universidad Nacional Autónoma de Baja California. ISSN 2594 – 1925. Volumen 5 (3): 312 – 330. <https://doi.org/10.37636/recit.v53312330>
45. Araiza, G. (2022). *La isla de calor en la Ciudad de México: Un análisis decadal (1950-2010)*. Revista Geográfica de América Central. Número 69(2), pp. 415 – 436. <https://dx.doi.org/10.15359/rcag.69-2.15>
46. Mills, G. (2008). *Luke Howard and The Climate of London*. University College Dublin, Irlanda. Weather – Vol. 63, No. 6.
47. Hidalgo-García, D., Arco-Díaz, J. (2022). *Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain)*. Sustainable Cities and Society 87 (2022) 104166. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.1014166>
48. Rodrigues, C., et al. (2021). *Study of the Urban Heat Island (UHI) Using Remote Sensing Data/Techniques: A Systematic Review*. Environments 2021, 8, 205. <https://doi.org/10.3390/environments8100105>
49. Zhou, B., et al. (2017). *The role of city size and urban form in the surface urban heat island*. Scientific Reports 7:4791. doi: 10.1038/s41598-017-04242-2
50. Peltier, E.P. (2017). *Urban Heat Island Demonstration And Temperature Progression Using Oklahoma City, Oklahoma*. Theses and Dissertations, University of North Dakota. 2308.
51. Cherlinka, V. (2020). *NDVI: Preguntas frecuentes y qué necesita saber*. EOS Data Analytics, Tecnología Agrícola, sitio web: <https://eos.com/es/blog/ndvi-preguntas-frecuentes/#:~:text=El%20Índice%20de%20Vegetación%20de,la%20salud%20de%20la%20vegetación>
52. LinkedIn: Remote Sensing. (2024). *How do you compare the spatial and spectral resolution of Landsat, Sentinel and MODIS sensors?* LinkedIn, sitio web: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-compare-spatial-spectral-resolution-landsat>
53. Jauregui, E. (1993). *Mexico City's urban heat island revisited*. ERDKUNDE 47 (3), 185–195. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1993.03.03>

54. PNUD México – INECC. (2016). *Análisis de balances energéticos atmosféricos en Puebla, Mexicali y Ciudad de México*. Proyecto 86487. Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México. México.
55. Moreno, C., et al. (2012). *Valores de las Componentes del Balance de Energía en la Superficie – Atmósfera en el Centro de Barcelona en Verano*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. Nº. 60 – 2012, pp. 427 – 429. ISSN: 0212 – 9426.
56. Picone, N. (2021). *Impactos del crecimiento de las ciudades en los balances energéticos urbanos. El caso de Tandil, Argentina (2004-2017)*. Revista Geográfica Digital, 2021, Vol. 18, pp. 138 -147. E-ISSN: 1668-5180. <http://dx.doi.org/10.30972/geo.183546>
57. Dudorova, N., Belan, B. (2022). *The Energy Model of Urban Heat Island*. Atmosphere 2022, 13, 457. <https://doi.org/10.3390/atmos13030457>
58. García-Cueto, O. R., et al. (2007). *Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use*. Atmósfera 20(2), pp.111-131.
59. Clounga, M., et al. (2015). *The role of urban vegetation in temperature and heat island effect in Querétaro city, México*. Atmósfera 28(3), 205-218 (2015). doi: 10.20937//ATM.2015.28.03.05
60. Oke, T.R. (1978). *Boundary Layer Climates*. London, England. ISBN: 9780416705300
61. K. Parsons. (2014). *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. ISBN 9781466595996
62. P.R.N. Childs, J.R. Greenwood, C.A. Long. (2000) *Review of temperature measurement*. Rev. Sci. Instrum. 71 (8) 2959–2978.
63. Ahmed, M.W., et al. (2016). *Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059>
64. Szagri, D., et al. (2023). *How can we predict where heatwaves will have an impact? – A literature review on heat vulnerability indexes*. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101711>
65. World Trade Center Ciudad de México. (2021). *El rascacielos más icónico de la CDMX*. Sitio Web: <https://wtcmexico.mx/>

66. Betancourt, E. (2020). *Centro Internacional de Exposiciones y Convenciones - World Trade Center (CIEC-WTC)*. Bioconstrucción y energía alternativa, sitio web: <https://bioconstruccion.com.mx/ciec-wtc-cdmx/>
67. Betancourt, E. (2021). *Pepsi Center WTC*. Bioconstrucción y energía alternativa, sitio web: <https://bioconstruccion.com.mx/pepsi-center-wtc/>
68. United Nations (2021). *Climate Action: Greenwashing - the deceptive tactics behind environmental claims*. United Nations, sitio web: <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/greenwashing#:~:text=By%20misleading%20the%20public%20to,delay%20concrete%20and%20credible%20action>
69. Gaceta UNAM. (2019). *Reserva ecológica del Pedregal de San Ángel, única en el mundo*. Gaceta UNAM, México, sitio web: <https://www.gaceta.unam.mx/reserva-ecologica-del-pedregal-de-san-angel-unica-en-el-mundo/>
70. Paz, S. (2023). *A 40 años de la REPSA, un desafío para reflexionar sobre el concepto de desarrollo*. Facultad de Ciencias, UNAM. México. Sitio web: <https://www.fciencias.unam.mx/noticias/2023/40-aniversario-repsa>
71. Krieger, P. (2021). *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA)*. Guía del Patrimonio Científico y Tecnológico de la CDMX, sitio web: <https://patrimonio-cyt-cdmx.colmex.mx/reserva-ecologica-del-pedregal-de-san-angel-repsa/>
72. Sultana, S., Satyanarayana, A.N.V. (2022). *Urban heat island: land cover, changes, management, and mitigation strategies*. Global Urban Heat Island Mitigation: Chapter 4 (pp. 71 – 93). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00009-3>
73. Palme, M., Carrasco, C. (2022). *Urban heat island in Latin American cities: a review of trends, impacts, and mitigation strategies*. Global Urban Heat Island Mitigation: Chapter 12 (pp. 251 – 267). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00014-7>
74. Aleksandrowicz, O. (2022). *Mapping and management of urban shade assets: a novel approach for promoting climatic urban action*. Global Urban Heat Island Mitigation: Chapter 1 (pp. 1 – 27). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00003-2>
75. Dardir, M., Berardi, H. (2022). *Air quality and heat-related health impacts of increasing urban greenery cover*. Global Urban Heat Island Mitigation: Chapter 13 (pp. 251 – 267). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00008-1>

76. Trevilla, M. (2023). *El efecto del albedo: un arma contra el cambio climático*. El Financiero, sitio web: <https://www.elfinanciero.com.mx/manuel-trevilla-fenomenos-digitales/2023/10/09/el-efecto-albedo-un-arma-contra-el-cambio-climatico/>
77. McPhearson, T., et al. (2023). *Nature Based Solutions for Cities*. Edward Elgar Publishing. <https://dx.doi.org/10.4337/9781800376762>
78. Snahouse, S., Benhassine, N. (2017). *Quantifying the Impact of Green-Roofs on Urban Heat Island Mitigation*. International Journal of Environmental Science and Development, Vol 8, No 2. doi: 10.18178/ijesd.2017.8.2.932
79. Ávila-Hernández, A., et al. (2023). *Research and development of green roofs and green walls in Mexico: A review*. Science of Total Environment 856 (2023) 158978. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158978>
80. Mayen-Huerta, C. (2022). *Rethinking the distribution of urban green spaces in Mexico City: Lessons from the COVID-19 outbreak*. Urban Forestry and Urban Greening 70 (2022) 127525. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127525>
81. Grajeda-Rosado, R., et. al. (2023). *La importancia de la isla de calor urbano como un indicador más a tomar en cuenta en los procesos de planeación urbana en las ciudades de México*. Revista: e-RUA, Vol 15, Núm. 03. Universidad Veracruzana. México. ISSN: 2954-4149. <https://doi.org/10.25009/e-rua.v15i03.192>
82. Ramírez, C. (2011). *Normatividad de las azoteas verdes*. Arquitectura México, sitio web: <https://arquitecturamexico.wordpress.com/2011/12/13/normatividad-de-las-azoteas-verdes/>
83. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *PROY-NADF-013-RNAT-2017, Especificaciones técnicas para la instalación de Sistemas de Naturación en la Ciudad de México*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, SEDEMA.
84. Tan, N. (2022). *A Garden in the Sky: Chicago's Green Rooftop Revolution*. Midstory, sitio web: <https://www.midstory.org/a-garden-in-the-sky-chicagos-green-rooftop-revolution/>
85. Estévez, R. (2013). *Chicago y sus techos verdes*. Eco inteligencia, sitio web: <https://www.ecointeligencia.com/2013/02/chicago-techos-verdes/#:~:text=Chicago%20exige%20que%20todos%20los,los%20permisos%20necesarios%20m%C3%A1s%20r%C3%A1pido.>
86. Miao, C., et al. (2020). *Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons*. Building and Environment, Vol 168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106497>

87. Yu, T., et. al. (2017). *The Impact of Selecting Different Airport Sites on the Urban Heat Island Effect: a Case of Study of Dalian, China*. Advances in Social Science, Education and Humanities Research (ASSEHR), volume 130. Atlantis Press.

Anexos

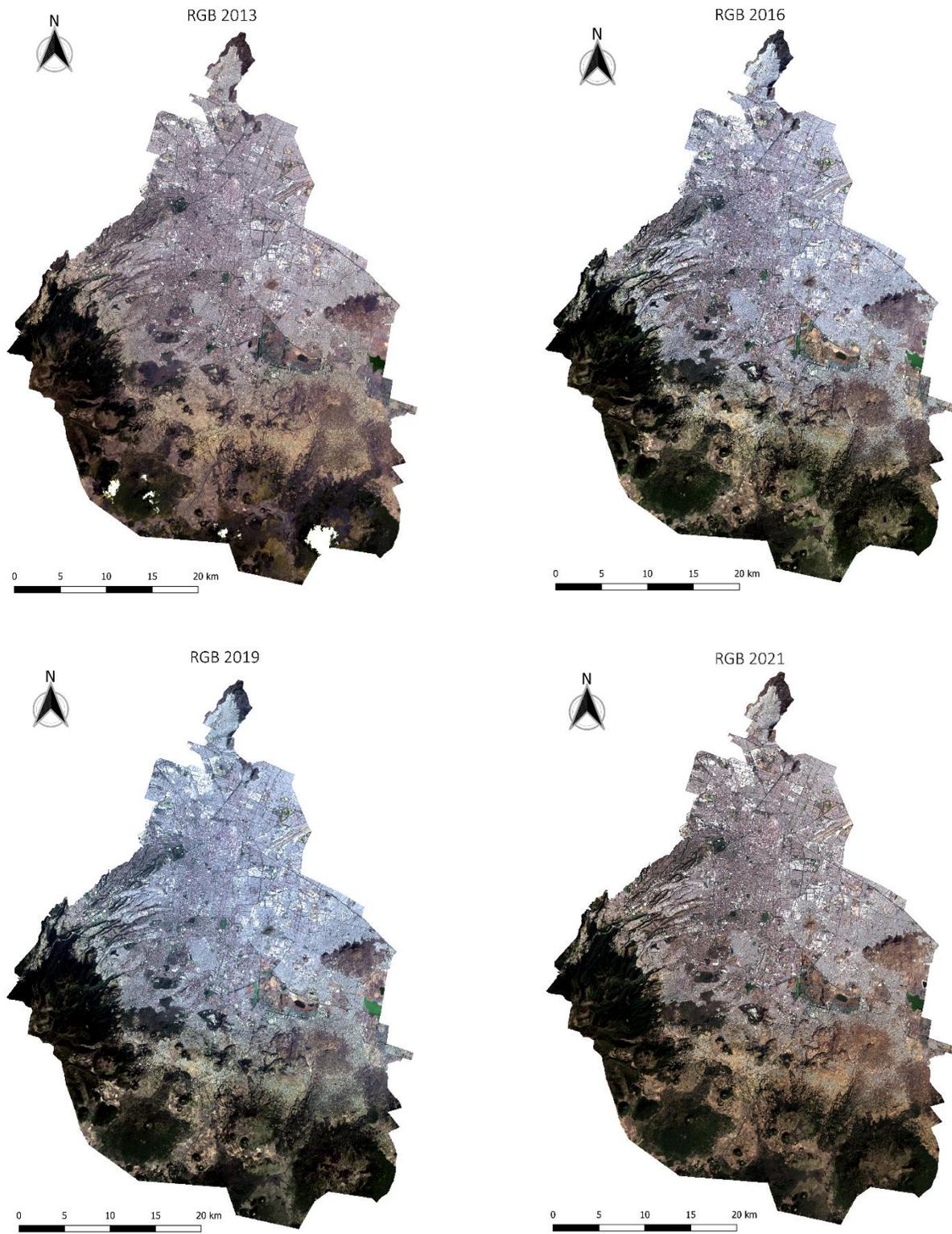


Figura 60. Imágenes de color verdadero correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.

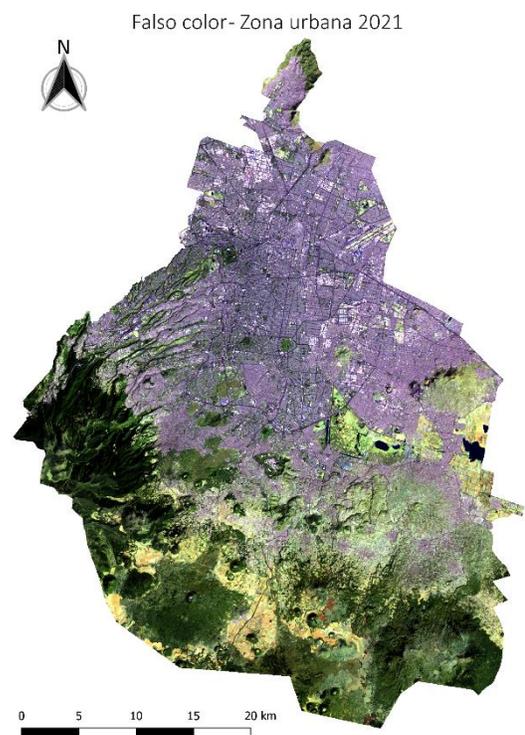
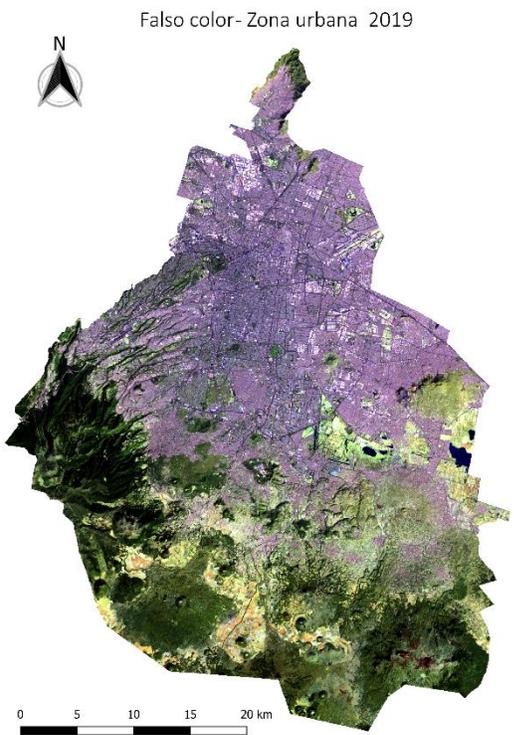
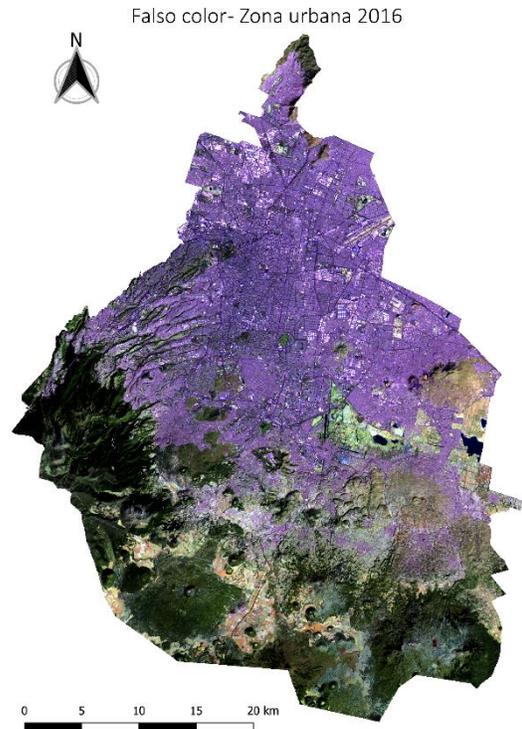
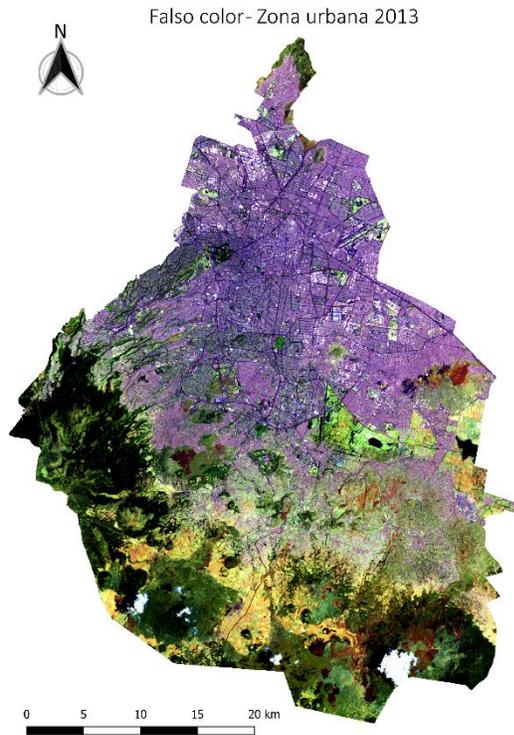


Figura 61. Imágenes de falso color correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.

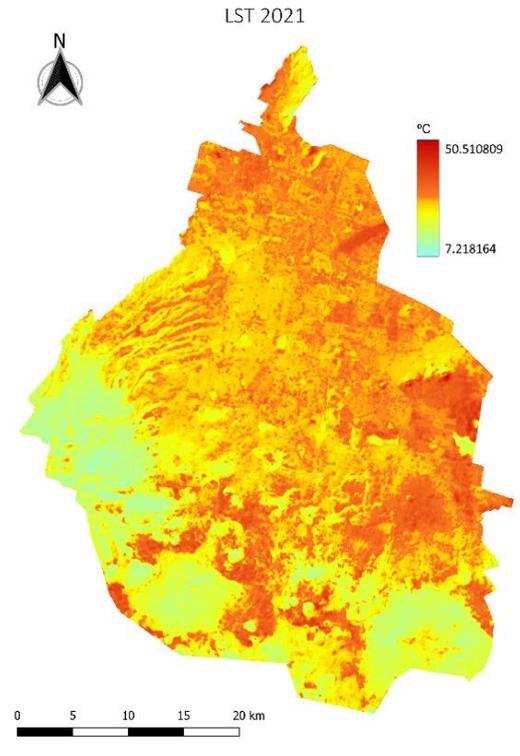
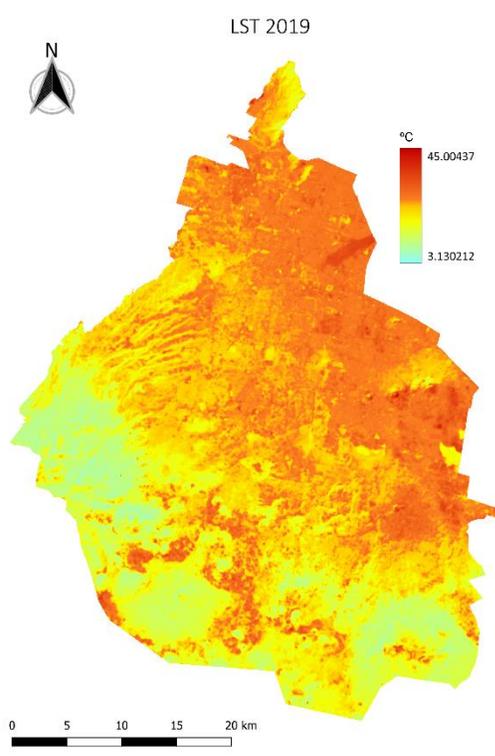
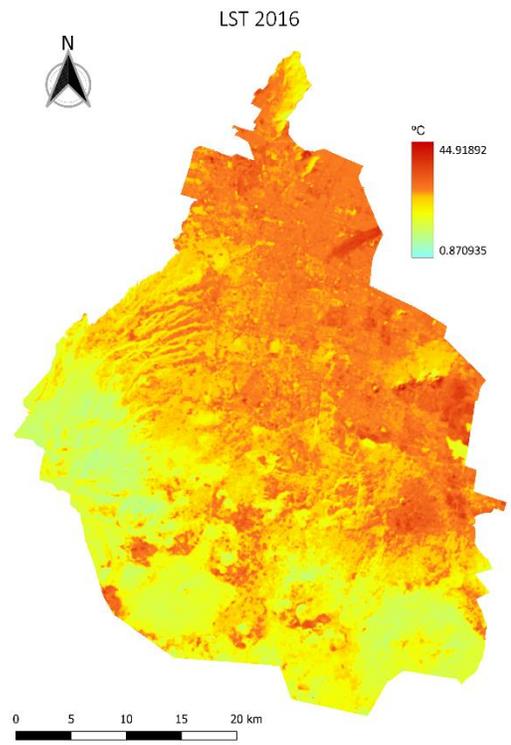
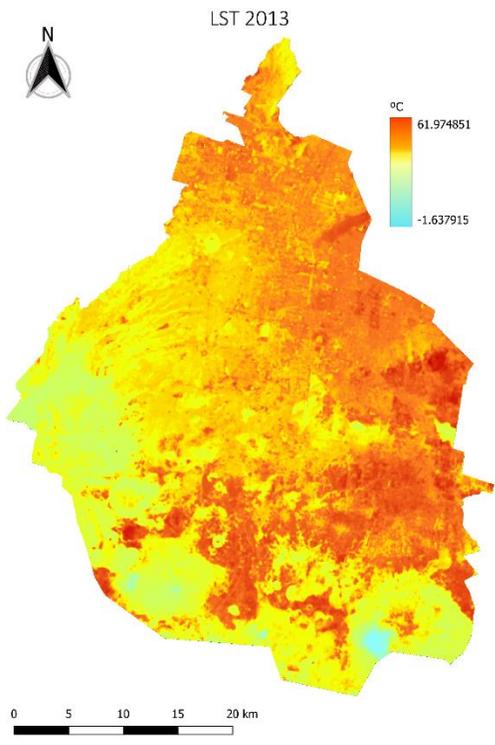


Figura 62. Imágenes de LST correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.

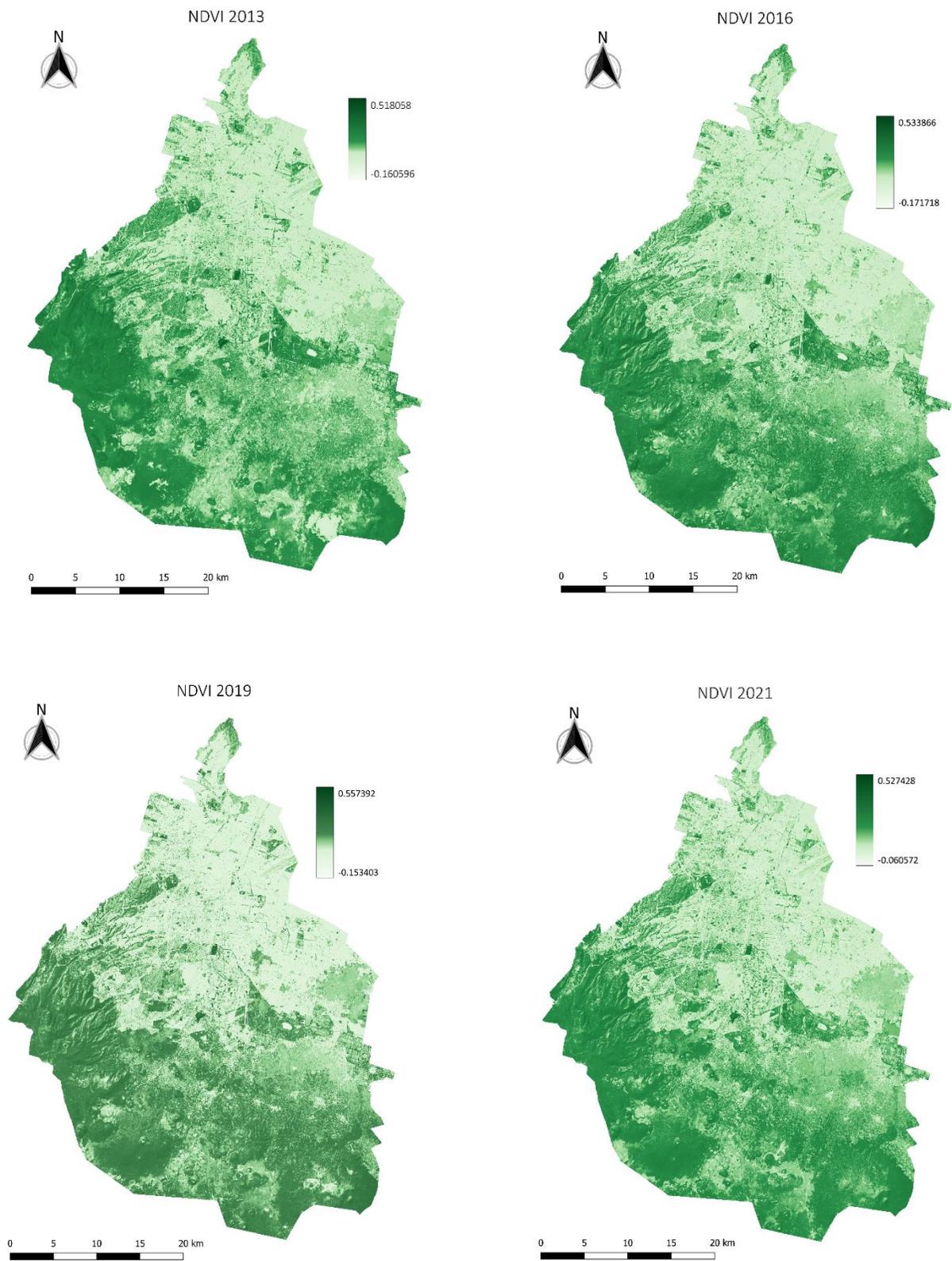


Figura 63. Imágenes de NDVI correspondientes a diferentes fechas. Elaboración propia.